

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta stavební  
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Modelová analýza interakce horninového prostředí  
s výztuží kruhového podzemního díla  
v závislosti na tuhosti výztuže

Model Analysis of the Interaction of the Geological Environment  
with a Circular Reinforcement of Underground Works,  
Depending on the Reinforcement Stiffness

Student:

Alice Hastíková

Vedoucí bakalářské práce:

doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D.

Ostrava 2012

## Zadání bakalářské práce

Student: **Alice Hastíková**  
Studijní program: **B3607 Stavební inženýrství**  
Studijní obor: **3647R017 Geotechnika**  
Téma: **Modelová analýza interakce horninového prostředí s výztuží kruhového podzemního díla v závislosti na tuhosti výztuže**  
**Model Analysis of the Interaction of the Geological Environment with a Circular Reinforcement of Underground Works, Depending on the Reinforcement Stiffness**

### Zásady pro vypracování:

1. Podstata vzájemné interakce horninového prostředí a výztuže, pracovní -deformační charakteristiky horniny a výztuže
2. Modelování interakce horninového prostředí s výztuží kruhového podzemního díla programovým systémem Plaxis za předpokladu rozdílných tuhostí výztuže
3. Analýza výsledků numerického modelování z hlediska vnitřních sil ve výztuži, deformace výztuže, zatížení výztuže a parametrů poklesové kotliny na povrchu
4. Závěrečné zhodnocení výsledků modelování

### Seznam doporučené odborné literatury:

1. Aldarí, J.: *Mechanika podzemních konstrukcí*. VŠB-TU Ostrava: 1999. ISBN 80-7078-695-7.
2. Kolymbas, D.: *Tunnelling and Tunnel Mechanics*. Springer: Berlín, 2005. ISBN -10 3-540-25196-0.
3. Brinkgreve, R.B.J.: *Plaxis manual*. Balkema: 2002. ISBN 905809 508 8.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. RNDr. Eva Hrubešová, Ph.D.**

Datum zadání: **31.10.2011**

Datum odevzdání: **30.04.2012**



  
doc. RNDr. Eva Hrubešová, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
prof. Ing. Darja Kubečková Škulínová, Ph.D.  
děkanka fakulty

### **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: .....

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byla jsem seznámena s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č.111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě .....

## Anotace

Předmětem práce je modelová analýza spolupůsobení horniny s výztuží kruhového podzemního díla v závislosti na rostoucí tuhosti výztuže. Ostěním podzemního díla je železobetonová (ocelobetonová) výztuž. Tuto heterogenní výztuž však nelze v programu Plaxis nadefinovat, proto jsou vstupními údaji tuhosti výztuže, získané z programu HOMO, ve kterém byly přetvárné materiálové charakteristiky heterogenního průřezu zhomogenizovány. Železobetonová výztuž je typická rostoucí tuhostí zapříčiněnou tuhnutím stříkaného betonu. V programu Plaxis bylo namodelováno celkem pět podzemních kruhových děl, každé s vyšší tuhostí výztuže. Oblastmi pozorování byly průběhy parametrů poklesové kotliny, popsané vzdáleností inflexního bodu a poklesem na povrchu, dále totální posuny výztuže a vnitřní síly ve výztuži, z jejichž normálových sil a ohybových momentů byla odvozena napětí v krajních vláknech ve výztuži vždy pro strop, bok a dno díla. Tam, kde se vyskytovala extrémní napětí, byla zpětně zjištěna napětí po výšce heterogenního ŽB průřezu pomocí programu HOMO. To vše s ohledem na dvojí boční tlak podle Terzaghiho a Jákyho vztahu.

**Klíčová slova:** modelování v Plaxisu, rostoucí tuhost výztuže, parametry poklesové kotliny, napětí v krajních vláknech homogenizovaného průřezu, napětí po výšce průřezu ocelobetonové výztuže

## Annotation

The model analysis of the interaction of the geological environment with circular reinforcement of the underground work, depending on the reinforcement stiffness, is the subject of this work. The lining of the underground work is to be of reinforced concrete material. However this heterogeneous reinforcement is not able to be defined in program Plaxis, hence stiffness gotten from program HOMO, in which the heterogenic cross-section deformational material characteristics were homogenized, is the input data. The reinforced concrete lining is typical of its growing stiffness caused by shotcrete hardening. Five underground works in total, each of them with higher stiffness were modeled in program Plaxis. Observation areas were courses of parameters of the settlement basin on the surface described by the inflective point distance and the settlement

on the surface, further total displacements of the reinforcement; internal forces of the reinforcement, from which axial forces and bending moments were used to deduce stresses on edges of the cross-section, always for the ceiling, the side and the bottom of the circular work. Where extreme stress occurred, there the course of the stress along height of the heterogeneous reinforced concrete cross section was ascertained with help of program HOMO. This all, with respect of two side pressures up to Terzaghi's and Jaky's formulation.

**Key words:** modeling in Plaxis, growing stiffness of the reinforcement, parameters of settlement basin, stress on edges of homogenized cross-section, stress along height of reinforced concrete cross section

## Obsah bakalářské práce

Seznam použitého značení	1
1. Úvod	2
2. Systém hornina - výztuž	3
3. Modelování interakce horninového prostředí s výztuží	5
3.1. Princip a metodika zpracování	5
3.2. Specifikace zadání	6
3.3. Program Plaxis	7
3.4. Nadefinování modelu v programu Plaxis	8
4. Porovnávání parametrů v závislosti na proměnné tuhosti a koeficientu bočního tlaku	17
4. 1. Parametry poklesové kotliny	17
4. 2. Čerpání smykové pevnosti, Plastické body	19
4. 3. Deformace, vnitřní síly a zatížení výztuže	22
4. 4. Napětí ve výztuži	28
5. Závěr	35
Použitá literatura	37
Poděkování	38

## Seznam použitého značení

$A$  – průřezová plocha [ $m^2$ ]  
 $E$  – modul pružnosti [ $MPa$ ]  
 $F_z$  – funkce napjatosti [-]  
 $K_o$  – koeficient bočního tlaku [-]  
 $M$  – ohybový moment (na metr délky díla) [ $kNm/m$ ]  
 $N$  – normálová síla (na metr délky díla) [ $kN/m$ ]  
 $R$  – poloměr díla [ $m$ ]  
 $W$  – průřezový modul [ $m^3$ ]

$c$  – soudržnost [ $kPa$ ]  
 $d$  – tloušťka ostění [ $m$ ]  
 $h$  – hloubka pod povrchem [ $m$ ]  
 $k$  – tuhost (na metr délky díla) [ $MPa/m$ ]  
 $p$  – primární napětí [ $MPa$ ]  
 $p_k$  – primární radiální napětí [ $MPa$ ]  
 $p_x$  – boční primární napětí [ $MPa$ ]  
 $p_z$  – svislé primární napětí [ $MPa$ ]  
 $r$  – poloměr Mohrovy kružnice [ $MPa$ ]  
 $s$  – proměnný průvodič [ $m$ ]  
 $t$  – čas [ $den$ ]

$\Delta r$  – posun výztuže [ $mm$ ]

$\beta$  – koeficient proběhnutých deformací [-]  
 $\gamma$  – objemová tíha [ $kN/m^3$ ]  
 $\nu$  – Poissonovo číslo [-]  
 $\varphi$  – úhel vnitřního tření [ $^\circ$ ]  
 $\sigma$  – napětí v tahu (tlaku) za ohybu (na metr délky díla) [ $MPa/m$ ]  
 $\sigma_1, \sigma_3$  – hlavní napětí [ $MPa$ ]  
 $\sigma_r$  – radiální napětí [ $MPa$ ]  
 $\sigma_t$  – tangenciální napětí [ $MPa$ ]

*Homo* – program HOMOGENIZACE (VŠB-TU Ostrava, kat. geotechniky a podz. stavitelství).

*Plaxis* – výpočtový program pro geotechnické výpočty ([www.plaxis.com](http://www.plaxis.com))

*Tuhá vana* – okrajová podmínka

*RDZ* – Reset Displacements to Zero – Vymazání posunů na nulu

*RSS* – Relative Shear shadings – Čerpání smykové pevnosti



# 1. Úvod

Systém hornina – výztuž je jedním z nejvíce problematických aspektů při výstavbě tunelů. Jsou zde nutné znalosti mnoha oborů přírodovědných a technických, které jsou potřebné pro správnou předpověď kooperace těchto dvou odlišných soustav, jejichž spolupůsobení se snažíme co nejdetailněji zachytit pomocí teoretických podkladů, modelování a samotné výstavby tunelu včetně monitoringu. Snahou výzkumníků, kteří se touto problematikou teoreticky zabývají, je zachytit obraz tohoto spolupůsobení, který je závislý na mnoha parametrech.

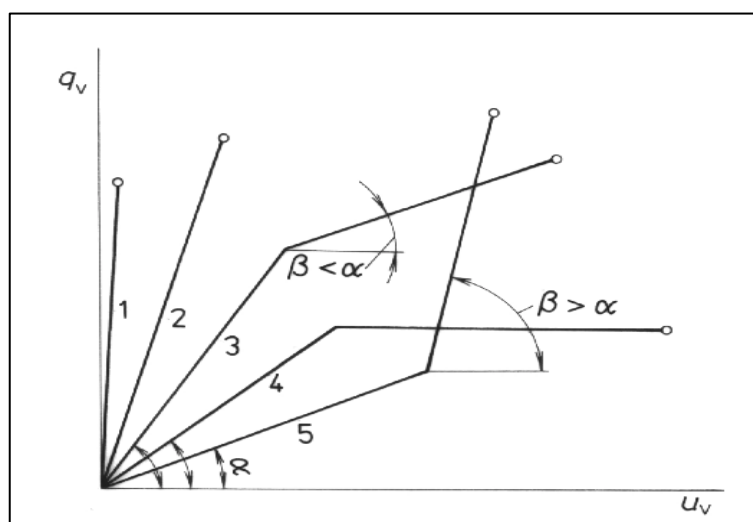
Tuhost primárního ostění je jedním z těchto parametrů, na kterém je systém závislý. V případě Nové rakouské tunelovací metody se primární ostění často skládá z KARI sítě a stříkaného betonu, jehož tuhost je časově proměnná, dána tuhnutím betonu. Ostění se také může vyztužit příhradovou výztuží umístěnou v určitých osových vzdálenostech od sebe. Ostění se instaluje hned po ražbě části tunelu nebo až po proběhnutí určitých posunů v masívu, při které se uvolňuje napětí v masívu, čímž se redukuje tlak působící na výztuž a reakce instalované výztuže se sníží.

Další parametrem, který je zde uvážen, je koeficient bočního tlaku  $K_o$ , jenž je závislý, mimo jiné, na přetvárných vlastnostech horninového prostředí. Velikost koeficientu bočního tlaku se obvykle vyjadřuje dvěma způsoby a jejich výsledné hodnoty se nemusí podobat. Tento fakt může například způsobit odlišné umístění extrémů vnitřních sil ve výztuži.

V zápětí je do problematiky zahrnut průběh samotného napětí po výšce průřezu řešené železobetonové výztuže. Jedním z výstupů modelování, v programu Plaxis, budou vnitřní síly ve výztuži, ze kterých bude odvozené napětí v krajních vláknech výztuže. Hodnoty těchto napětí budou použity jako vstupní údaje programu HOMO, jehož výstupy budou analyzovány pro zjištění průběhu napětí po výšce heterogenního průřezu ocelobetonové výztuže.

## 2. Systém hornina - výztuž

Do systému hornina – výztuž mohou vstupovat ostění s různými tuhostmi. Tuhosti výztuží přehledně popisuje obrázek č. 1, převzatý z [1]. Výztuž označená číslicí 1 pojednává o značné tuhosti této výztuže. Při velkém zatížení se výztuž poměrně málo deformuje, tybinková výztuž může být praktickým příkladem tohoto průběhu. Výztuž označená číslicí 2 se při stejném zatížení deformuje poměrně více než první výztuž, charakteristickou výztuží je klasická ocelová výztuž bez prokluzných spojek. Výztuž třetí je méně tuhá než předešlé a vyznačuje se poddajností se zmenšující se hodnotou reakce výztuže po dosažení meze počáteční únosnosti. Výztuž pod číslem 4 je po dosažení meze počáteční únosnosti poddajná s konstantní hodnotou reakce. Řekněme, že tato výztuž je takzvaným idealizovaným modelem předešlé výztuže 3. Pro poslední, pátou výztuž, je typická značná tuhost po dosažení meze počáteční únosnosti, jež je charakteristická pro ocelovou výztuž s třmenovými spoji.

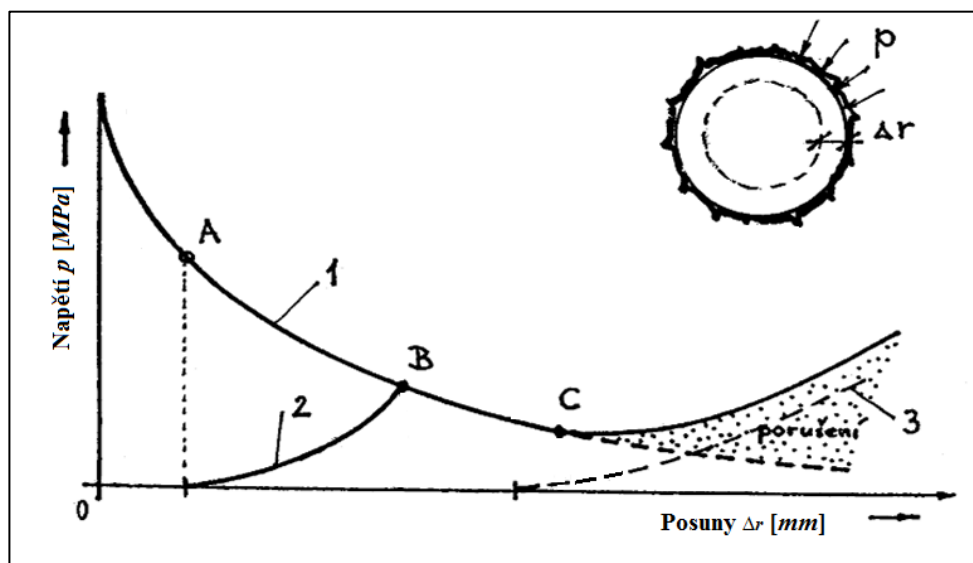


Obr. 1 – Pracovně deformační diagram výztuží s různými tuhostmi  
(převzato z [1])

Tyto tuhosti je nyní nutné začlenit do systému hornina – výztuž, který nejlépe vystihuje graf závislosti reakce výztuže na posunech, tzv. Fenner – Pacheroва křivka ztvárněna na obr. č. 2.

Na vodorovné ose je popsáno radiální napětí na obryse vyrubaného díla, toto napětí je označeno, jako  $p$ . Na horizontální ose jsou vyznačeny posuny  $\Delta r$ .

Křivka označena číslicí 1 vyjadřuje rostoucí posuny při měnícím se napětí. Dělí se na sestupnou a vzestupnou větev. Sestupná větev popisuje průběh snižujícího napětí při rostoucích posunech. To je dáno uvolňováním napětí na obryse díla. Vzestupná větev charakterizuje zvyšování napětí na obryse díla při rostoucích posunech, které je způsobeno nakypřením, neboli vznikem trhlin v okolí výrubu, čímž se zvyšuje objem horniny, která na sebe následně tlačí.



Obr. 2 – Fenner – Pacherova křivka

Křivka označena číslicí 2 je pracovně – deformačním diagramem výztuže. Bod A naznačuje zabudování výztuže po proběhnutí určitých posunů v masivu nebo po uběhnutí určitého času, neboť posuny probíhají s plynoucím časem. Bod B je průsečíkem křivek 1 a 2. Je to hlavní článek celého systému a základ principu systém hornina – výztuž, který je středem našeho zkoumání. V zásadě, se snažíme nalézt jeho vhodnou polohu v systému, jež je závislá na tuhosti výztuže, na primárním napětí v hornině a na proběhnutých posunech masívu před zabudováním výztuže. Bod B vystihuje situaci, kdy radiální napětí na obryse díla je zároveň reakcí výztuže na toto zatížení. Bod C je limitní polohou bodu B, tedy pokud zabudujeme výztuž tak, aby poloha průsečíku byla stále na sestupné větvi, výztuž stačí přenést napětí horniny a je minimálně namáhána. Je zde ale zapotřebí brát zřetel na procento již proběhnutých posunů a s tím spojený zmenšující profil díla. Křivka značená číslicí 3 odpovídá špatně zabudované výztuži – její tuhost je malá, anebo je pozdě instalována, což má za následek porušení stability a kolaps systému. Křivky se neprotínají a dochází k porušení (Obr. č. 2).

### 3. Modelování interakce horninového prostředí s výztuží

#### 3.1. Princip a metodika zpracování

Tuhost výztuže kruhového podzemního díla je přímoúměrná tloušťce ostění  $d$  a modulu pružnosti  $E$ , a nepřímoúměrná druhé mocnině poloměru díla  $R$ .

$$k = \frac{d \cdot E}{R^2} [MPa/m] \quad - 1 -$$

V případě železobetonové výztuže nelze do programu Plaxis nadefinovat jednu tuhost, neboť je složena ze dvou materiálů, z oceli a z betonu. Proto je zapotřebí tyto materiálové odlišnosti nějakým způsobem homogenizovat. K tomu je možné použít software HOMO, prostřednictvím kterého získáme jednu hodnotu modulu pružnosti homogenizovaného průřezu ostění. Tuhosti tohoto homogenizovaného průřezu s časem rostou, to je dáno tuhnutím betonu. Proto je model nadefinován s proměnnými hodnotami tuhostí.

Pomocí softwaru Plaxis jsme schopni namodelovat podzemní kruhové dílo v určité hloubce pod povrchem, ve které působí primární napětí odpovídající vlastnostem daného horninového prostředí a dané hloubce. Primární ostění kruhového podzemního díla bude namodelováno s proměnnými tuhostmi homogenizovaného materiálu o stejné tloušťce. Software Plaxis namodeluje výchozí stavy nevyztuženého díla a díla, které se vyztuží až po proběhnutí daných posunů. Cílem pozorování budou průběhy vnitřních sil výztuže spolu s jejími posuny a průběhy parametrů poklesové kotliny na povrchu, v závislosti na proměnné tuhosti. Jelikož jsou brány v úvahu dva koeficienty bočního tlaku, rozdíly mezi jejich výstupy budou taktéž porovnány.

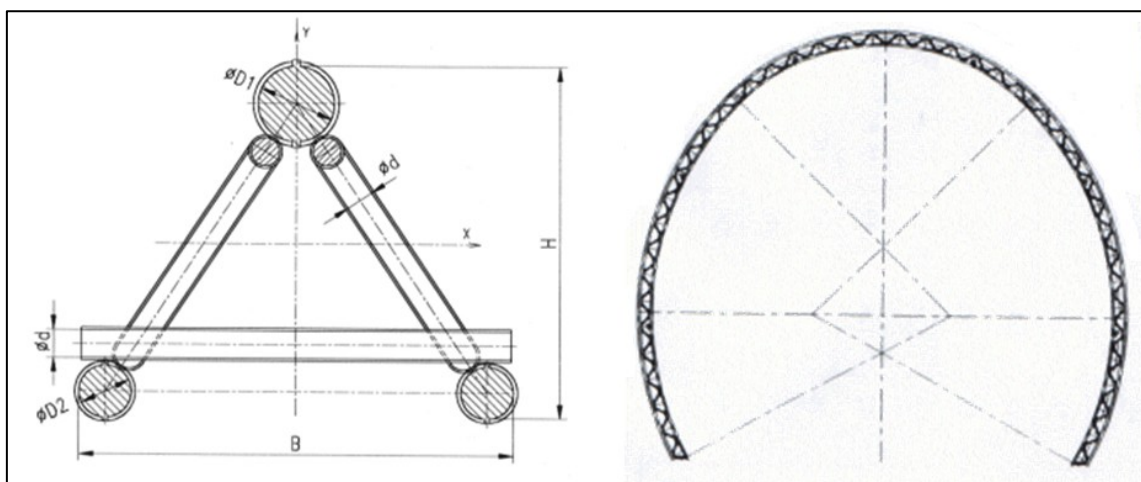
Tah (Tlak) za ohybu vypočteme ze získaných vnitřních sil, podle známého vzorce:

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W} [MPa] \quad - 2 -$$

Výsledné hodnoty těchto napětí jsou ale hodnotami v krajních vláknech průřezu. Abychom získali napětí po výšce průřezu, použijeme software HOMO, pomocí kterého získáme rozdělovací koeficienty a budeme tak moci stanovit napětí po výšce “reálného” (nehomogenizovaného) heterogenního průřezu, tedy napětí po výšce železobetonového průřezu.

### 3.2. Specifikace zadání

Primárním ostěním kruhového podzemního díla je železobetonová výztuž skládající se z příhradové výztuže ASTA 95, společnosti Ankra, spol. s.r.o, v osových vzdálenostech 1m a z jedné vrstvy stříkaného betonu. Na obrázku č. 3 je možné vidět geometrii příhradové výztuže a její příčný řez.



Obr. 3 – Příhradová výztuž typu ANKRA GT (vlevo – řez, vpravo - pohled)  
(převzato z [5])

Moduly pružnosti homogenizovaného průřezu výztuže v závislosti na čase jsou následující:

$t$ [dny]	$E$ [MPa]
0,5	15400
3	17800
7	19300
14	20500
28	21900

Tab. 1 – Tuhosti homogenizovaného průřezu

Vlastnosti horninového prostředí – jílovec:

Objemová tíha, $\gamma$	22kN/m <sup>3</sup>
Modul pružnosti, $E$	30MPa
Poissonovo číslo, $\nu$	0,35
Úhel vnitřního tření, $\varphi$	17°
Soudržnost, $c$	40kPa

Tab. 2 – Vlastnosti horninového prostředí

Geometrie modelu je dána:

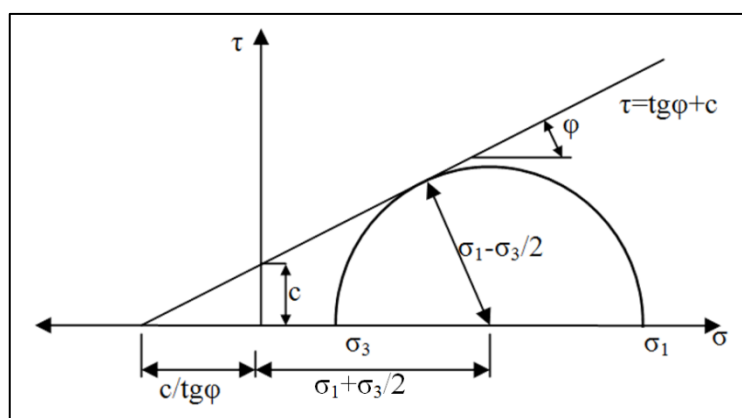
Tloušťka ostění, $d$	$0,2m$
Poloměr díla (vnitřní), $R$	$1m$
Hloubka díla pod povrchem	$15m$

Tab. 3 – Geometrie modelu

Před zabudováním výztuže proběhne 30% deformací. Není zde uvažována přítomnost vody.

### 3.3. Program Plaxis

Program Plaxis je výpočtový program fungující na principu metody konečných prvků. V Plaxisu je na výběr více materiálových modelů, však v případě tohoto modelu je použit Mohr-Coulombovým model, jehož základní princip je zobrazen na obrázku č. 4.



Obr. 4 – Mohr – Coulombový materiálový model

Do Mohr – Coulombového materiálového modelu jsou zapotřebí vstupní údaje, jenž jsou vypsány v tabulce č. 2. Principem tohoto materiálového modelu je Mohr – Coulombovo kritérium porušení, které nastává při protnutí Mohrovy kružnice s Mohrovou obalovou čarou, která je funkcí úhlu vnitřního tření a soudržnosti.

### 3.4. Nadefinování modelu v programu Plaxis

Před samotnou definicí modelu je nutné se zapřemýšlet o jeho geometrii. Zadaná hloubka díla je jediným známým rozměrem modelu. Vzdálenost, ve které se tamější napětí blíží hodnotám původního geostatického napětí před vyrubáním díla, je ta minimální pro vložení okrajových podmínek, zbylé rozměry modelu jsou tedy určeny právě těmito vzdálenostmi. Určení vzdáleností těchto okrajových podmínek od obrysu díla je podrobně vysvětleno v [1] – kapitola 3.2.

V zadání je určena hloubka díla 15 metrů pod povrchem modelu, ujistěme se, že hodnoty radiálního a tangenciálního napětí, ve stejné vzdálenosti na bocích a na dně, se blíží hodnotám původního geostatického napětí. Má – li funkce napjatosti pro kruhový otvor při existenci bočních napětí, tvar:

$$F_v = F_{p_z} + F_{p_x} = \frac{p_z}{4} \left[ s^2 - 2R^2 \ln s + \frac{(s^2 - R^2)}{s^2} \cos 2\varphi \right] + \frac{p_x}{4} \left[ s^2 - 2R^2 \ln s + \frac{(s^2 - R^2)}{s^2} \cos 2\varphi \right] \quad - 3 -$$

Kde  $R$  - poloměr otvoru  $[m]$ ,

$s$  - proměnný parametr (průvodič) – vzdálenost od obrysu díla  $[m]$ ,

$\varphi$  - úhel měřený od osy  $x$   $[^\circ]$ ,

$p_z$  – svislé primární napětí  $[MPa]$ ,

$p_x$  – boční primární napětí  $[MPa]$ ,

pak radiální a tangenciální napětí jsou dána vztahy:

$$\sigma_t = \frac{p_z}{2} \left[ 1 + \frac{R^2}{s^2} + \left( 1 + 3 \frac{R^4}{s^4} \right) \cos 2\varphi \right] + \frac{p_x}{2} \left[ 1 + \frac{R^2}{s^2} - \left( 1 + 3 \frac{R^4}{s^4} \right) \cos 2\varphi \right] + \frac{p_z}{2} \left[ 1 - \frac{R^2}{s^2} - \left( 1 - 4 \frac{R^2}{s^2} + 3 \frac{R^4}{s^4} \right) \cos 2\varphi \right] + \frac{p_x}{2} \left[ 1 - \frac{R^2}{s^2} + \left( 1 - 4 \frac{R^2}{s^2} + 3 \frac{R^4}{s^4} \right) \cos 2\varphi \right] \quad - 4 -$$

tedy výsledná napětí pro bok díla ( $\varphi=0^\circ$ ) ve vzdálenosti  $14R$  od obrysu díla jsou:

$$\sigma_t = 1,00259p_z + 0,00251p_x$$

$$\sigma_r = 0,00761p_z + 0,98728p_x$$

- 5 -

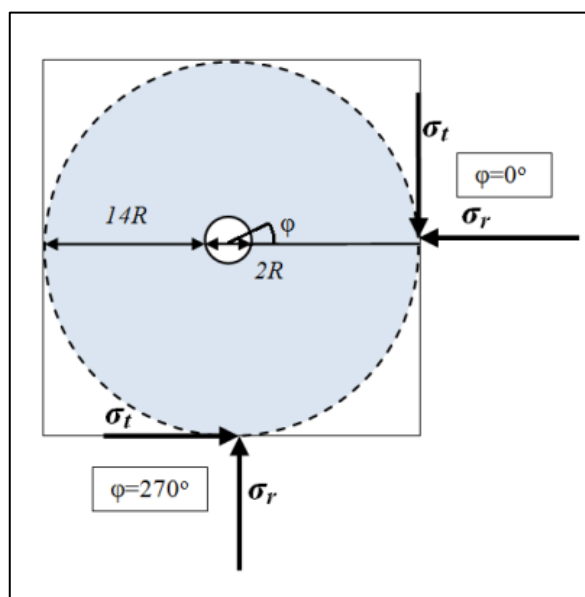
a výsledná napětí pro dno díla ( $\varphi=270^\circ$ ) ve vzdálenosti  $14R$  od obrysu díla jsou:

$$\sigma_t = 0,00251p_z + 1,00259p_x$$

$$\sigma_r = 0,98728p_z + 0,00761p_x$$

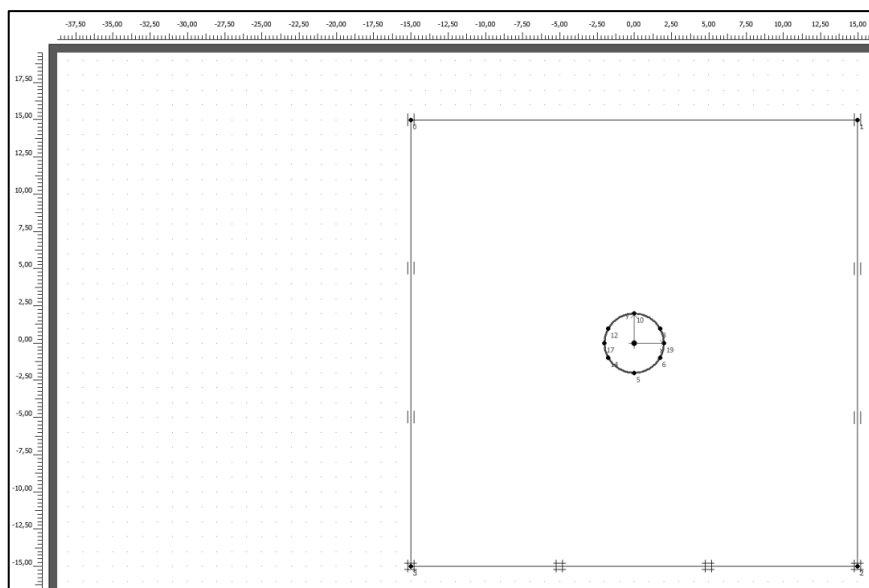
- 6 -

Z výsledných vztahů lze soudit, že ve vzdálenosti  $14R$  od obrysu díla se napětí tangenciální blíží hodnotám primárního svislého napětí na boku díla a napětí radiální na boku díla se blíží bočnímu primárnímu napětí. Na dně je tomu naopak, neboť směr tangenciálního napětí je stejný se směrem bočního napětí a radiální napětí působí ve směru svislého primárního napětí, zobrazeno na obrázku č. 5.



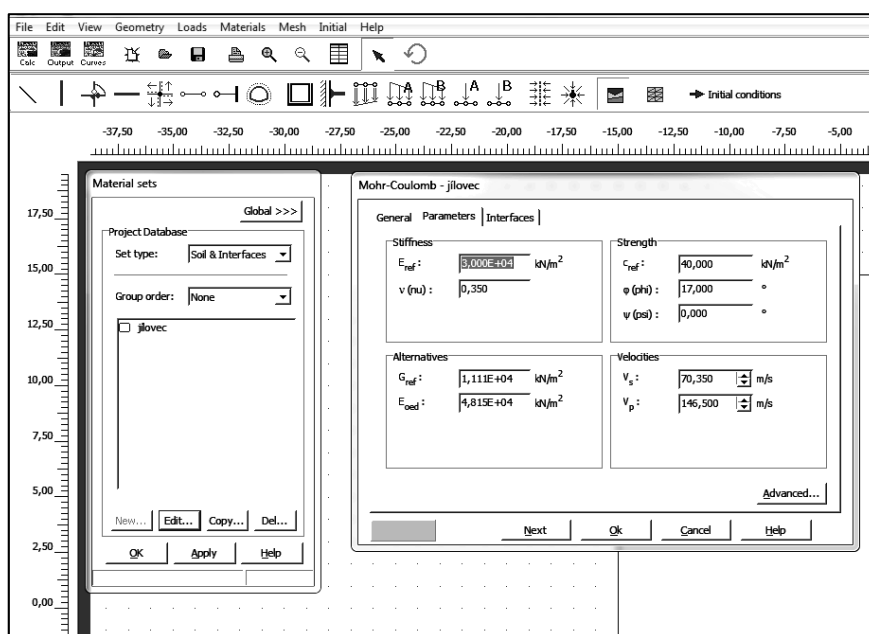
Obr. 5 – směry radiálního a tangenciálního napětí pro různá umístění po obvodu díla



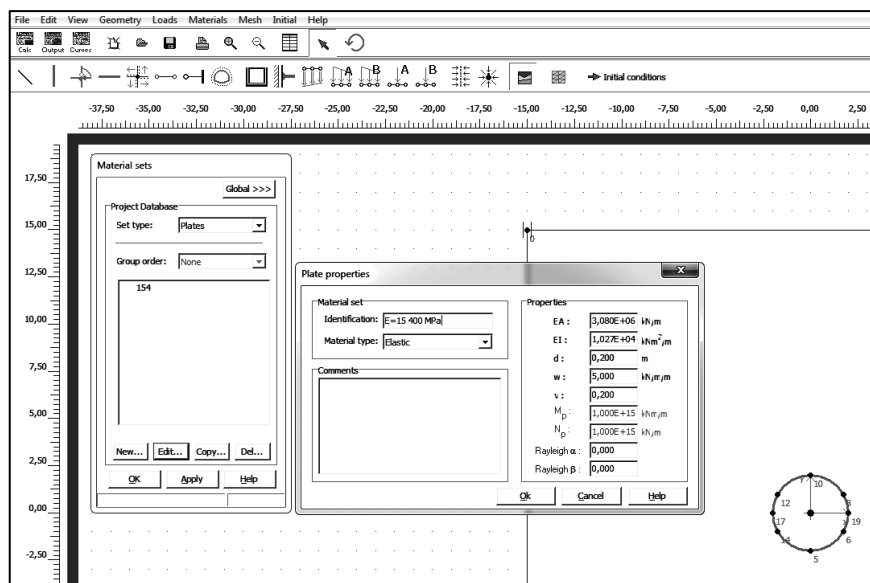


Obr. 6 – Geometrie modelu

Geometrie modelu, definice horninového prostředí a výztuže podzemního kruhového díla jsou znázorněny na obrázku č. 7, 8. Střed tunelu je vložen do nuly daného souřadnicového systému. Okraje modelu jsou od středu vzdáleny 15 metrů. Na těchto okrajích jsou vloženy okrajové podmínky – *Tuhá vana*, jež jsou znázorněny na obr. č. 6. *Tuhá vana* představuje vložené posuvné podpory na bočních hranicích modelu a pevné podpory na dně modelu, vložené podél těchto hranic modelu.

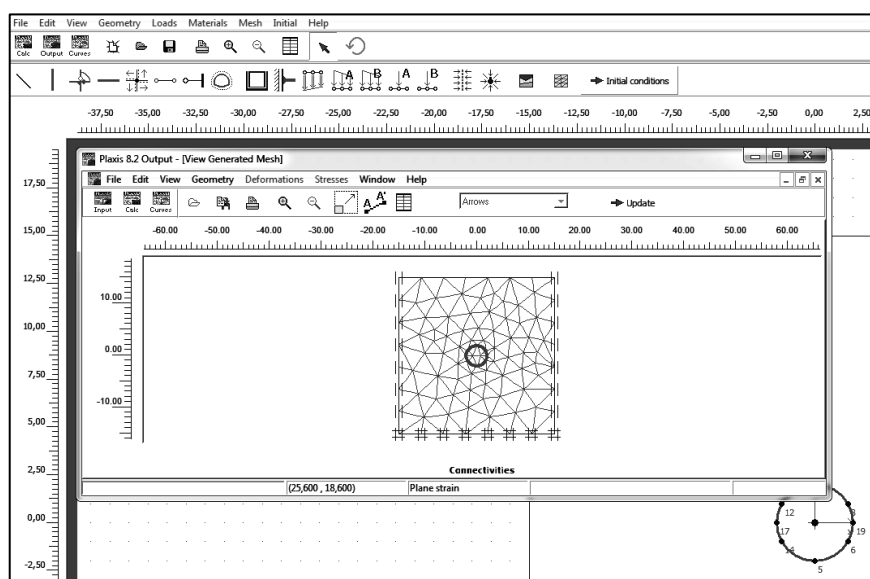


Obr. 7 – Definování horninového prostředí



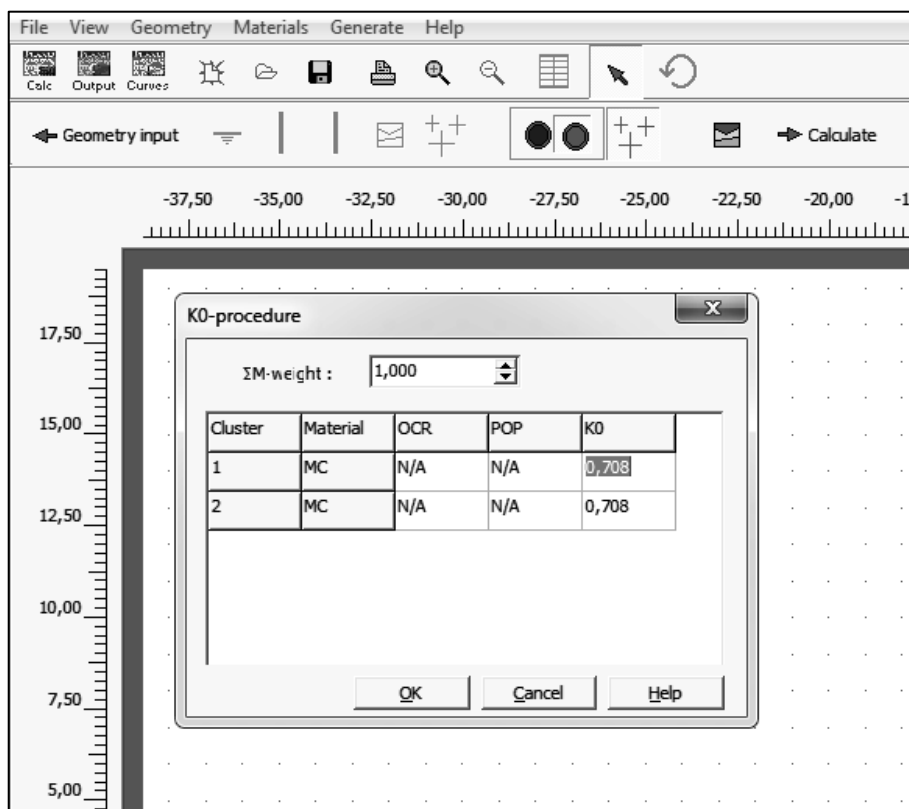
Obr. 8 – Definování výztuže

Obrázek č. 8 vystihuje, jakým způsobem se zadávají parametry výztuže. Pole *Identification* (z angl. Identifikace) je vyplněno označením proměnného modulu pružnosti. V tomto případě „E = 15 400 MPa“. Pro každý model jsou materiálové charakteristiky výztuže odlišné. Vše ostatní zůstává stejné. Obr. č. 9 představuje automaticky vygenerovanou hrubou síť, která je kompozicí konečných prvků. Síť je složena z bodů, linií a z jejich seskupení (ploch ohraničených právě těmito liniemi) tvořících trojúhelníkové prvky.



Obr. 9 – Vygenerovaná síť

V poli *Initial conditions* (z angl. Počáteční podmínky), (možno vidět na obr. 9), je možné nadefinovat hydrostatickou napjatost a geostatickou napjatost. Hydrostatická napjatost zde není řešena, neboť se v prostředí voda nevyskytuje. Program vloží hladinu podzemní vody automaticky pod hranici nadefinované hranice modelu, tedy 15 metrů pod nulou. Při definování geostatické napjatosti je možné zadat koeficient bočního tlaku dle vlastního uvážení.



Obr. 10 – Počáteční podmínky

Vztah pro určení koeficientu bočního tlaku neboli koeficientu zemního tlaku v klidu je řešen dvěma způsoby. Program Plaxis automaticky vygeneruje koeficient podle Jákyho vztahu, který je závislý na úhlu vnitřního tření zeminy  $\varphi$ . Pro zadané hodnoty vnitřního tření horninového prostředí je tedy koeficient bočního tlaku:

$$K_o = 1 - \sin \varphi = 1 - \sin 17 = 0,7076 \quad - 7 -$$

Tento vztah se ale používá spíše pro nesoudržné zeminy. Parametry zadaného horninového prostředí se soudržností 40 kPa naznačují, že se jedná o soudržnou zeminu. S touto vstupní

hodnotou koeficientu bočního tlaku bude namodelováno pět modelů, každý o vyšší tuhosti výztuže. Další vstupní hodnotou pro dalších pět modelů o rostoucí tuhosti výztuže bude hodnota jiného vyjádření koeficientu bočního tlaku, podle Terzaghiho vztahu, jež je závislé na Poissonově čísle  $\nu$ .

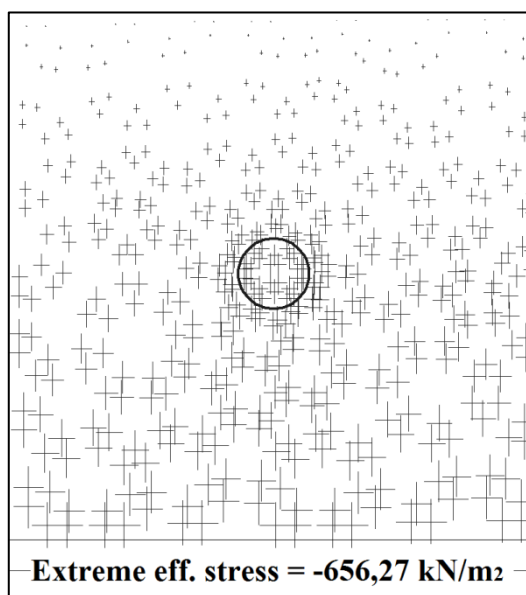
$$K_o = \frac{\nu}{1-\nu} = \frac{0,35}{1-0,35} = 0,5385 \quad - 8 -$$

Odkazem *Calculate* (obr. 10) je možné vstoupit do kalkulačního modulu, jenž je vyobrazen na obrázku č. 11. Záložky *General* (z angl. Všeobecně) a *Parameters* (z angl. Parametry) jsou vloženy do jednoho obrázku pod sebe pro přehlednost. Naspodu obrázku jsou vypsány fáze, které se definují.

Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Time	Wa...	First	Last
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0,00 ...	0	0	0
✓ výrub	1	0	Plastic	Staged construction	0,00 ...	1	1	2
✓ pokl. kotlina	2	1	Plastic	Staged construction	0,00 ...	2	3	4
✓ výztuž	3	1	Plastic	Staged construction	0,00 ...	3	5	6

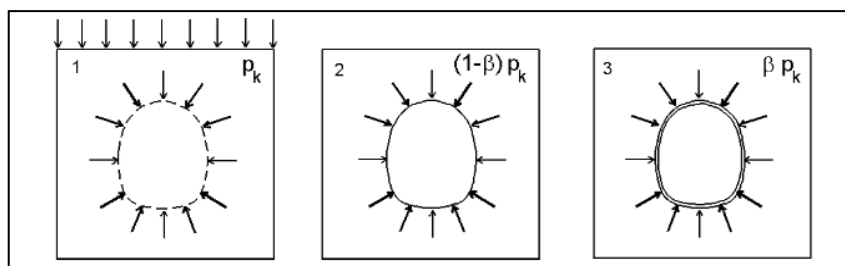
Obr. 11 – Kalkulační modul

*Initial phase* (z angl. původní fáze) je prvotní fází, kterou si program sám vytvoří. Nelze v ní editovat. Z jejího výstupu, je možné odečíst hodnoty napětí v jakémkoliv bodě nadefinovaného modelu, jehož hodnoty by měly odpovídat hodnotám původního geostatického napětí vyjádřeného pomocí  $\sigma = \gamma \cdot h$ , pro boční tlak pak  $\sigma = \gamma \cdot h \cdot K_o$ . Extrémní efektivní svislé napětí je vystiženo hodnotou  $656,27 \text{ kN/m}^2$ , což přibližně odpovídá hodnotě primárního geostatického svislého napětí  $\sigma = \gamma \cdot h = 22 \cdot 30 = 660 \text{ kN/m}^2$  v hloubce 30 metrů pod povrchem.



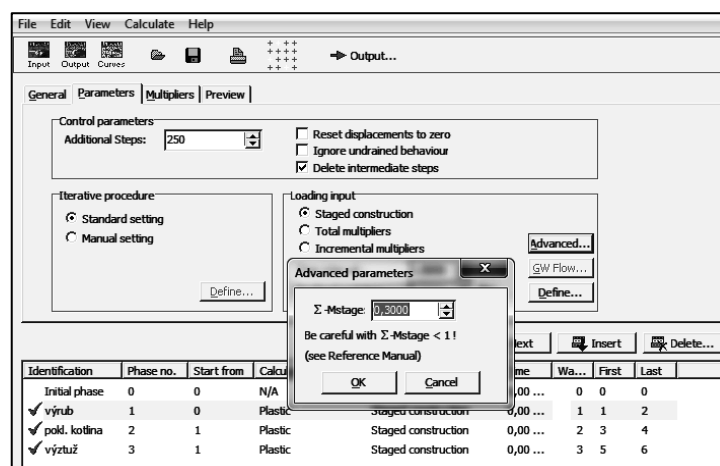
Obr. 12 – Output of Initial phase – Extreme effective principal stress

Fáze jedna je pojmenována jako výrub. V této fázi dojde k vyrubání díla, tedy k odstranění horniny z prostoru díla (přesněji z roviny ohraničené kružnicí). Tato fáze navazuje na *Initial phase*, tudíž výpočet bude z ní vycházet. V záložce *Parameters* je možné nadefinovat potřebné změny, které se v této fázi odehrají. V zadání je naznačeno, že před zabudováním výztuže proběhne 30% deformací masívu v okolí výrubu. Tato skutečnost musí být v modulu nadefinována ve fázi výrubu, neboť je potřebné, aby výpočet fáze zabudování výztuže, která bude následující fází, probíhal již po proběhnutí těchto posunů v masívu. Bude zde tedy nutné vejít do záložky *Advanced* a tam deformace nadefinovat. Metodiku nejlépe vystihuje použitý pramen [2], kde je vysvětlen princip pod názvem *β metoda*.



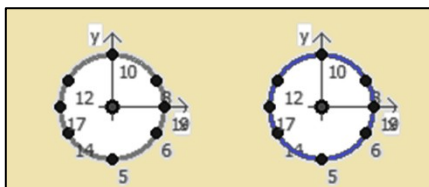
Obr. 13 –  $\beta$  metoda (převzato z [2])

Podstata  $\beta$  metody spočívá v rozdělení původního napětí působícího kolmo na obrys díla tedy radiálního napětí  $p_k$  do dvou částí a to na část  $(1-\beta)p_k$  původního napětí, které je aplikováno na model nevyztuženého díla a na část  $\beta p_k$  působícího na model vyztuženého díla. V programu Plaxis je namísto koeficientu  $\beta$  použito označení  $\Sigma Mstage$ , které je totožné se vztahem  $(1-\beta)$ . Na obrázku č. 13 je možné vidět ztvárnění této metody. Situace 1 vystihuje *Initial phase*, fázi, jež je totožná se situací vyobrazenou na obr. č. 12, situací před vyrušením horniny, kde na model budoucího výrubu působí radiální napětí  $p_k$ . Situace 2 vystihuje část  $(1-\beta)p_k$  primárního radiálního napětí působícího na model vyrušeného díla. Použitý pramen [2] popisuje napětí  $(1-\beta)p_k$  jako napětí působící na model nevyztuženého díla, v jehož vnitřní ploše jsou prvky sítě deaktivovány. Jeli v zadání, že před instalací výztuže proběhne 30% deformací v okolí výrubu, koeficient  $\beta$  je roven hodnotě 0,7, neboť  $(1-0,7)=0,3$  a součinitel  $\Sigma Mstage$  je roven hodnotě 0,3. Do fáze nazvané výrub je definováno  $\Sigma Mstage=0,3$  (obrázek č. 14). V následujících fázích, které se vyznačují zabudováním výztuže, působí radiální napětí na model vyztuženého díla o velikosti  $\beta p_k = 0,7 = (1-\Sigma Mstage)$ , není nutné se tím ale ve fázi zabudování výztuže zabývat, neboť systém automaticky hodnotu dopočítá.



Obr. 14 – Definition of Advanced parameters

Definice z hlediska odstranění horniny z prostoru díla a zabudování výztuže probíhá v záložce *Define*. Na obr. č. 15 je vlevo vykreslena fáze výrubu, vpravo fáze zabudování výztuže. Ve fázi výrubu je v modelu odstraněna hornina z prostor díla, ve fázi zabudování výztuže je v modelu aplikována výztuž.



Obr. 15 – Záložka *Define*  
(vlevo – bez výztuže, vpravo – s výztuží)

Jelikož se budou porovnávat parametry poklesové kotliny na povrchu a posuny výztuže, fáze výztuže jsou nadefinovány dvakrát. Jednou pod názvem poklesová kotlina a podruhé pod názvem výztuž. Rozdíl mezi zadáváním těchto dvou fází je v *RDZ* neboli Reset Displacement to Zero (z angl. vymaž posuny). Když budou vyhodnocovány parametry výztuže, tedy její vnitřní síly a posuny, je zapotřebí, aby předešlé posuny, které proběhly v masivu, byly vynulovány a následující výpočet proběhl za předpokladu, že s předešlými nyní počítat nemá, proto je políčko, Reset Displacement to Zero, označeno. Jakmile budou vyhodnocovány parametry poklesové kotliny, posuny, které proběhly ve fázi výrubu, musí být ve výpočtu zohledněny. V tabulce č. 4 jsou vyobrazeny rozdíly v zadávání jednotlivých fází kalkulačního modulu před provedením výpočtu. Po spuštění výpočtu se zobrazí Output, kterým je možné procházet dílčí výstupy.

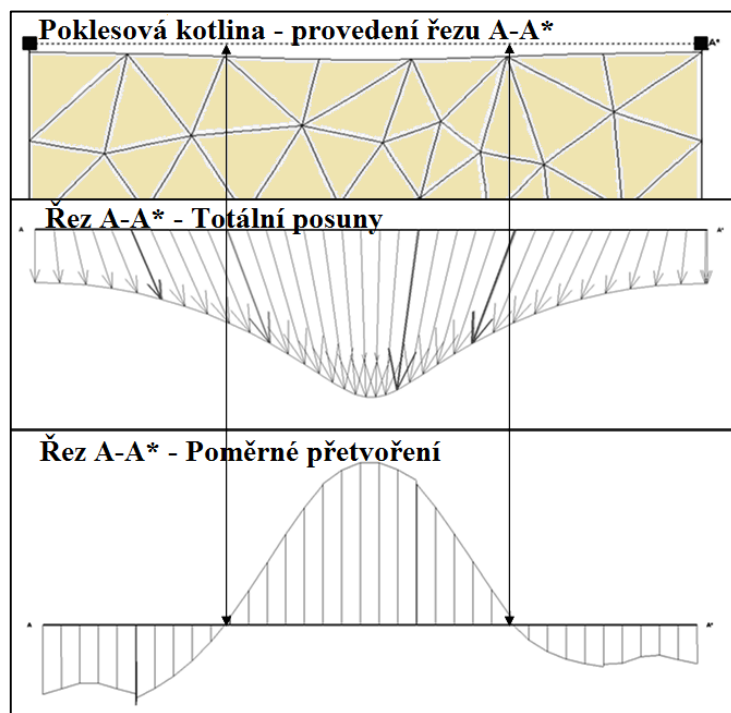
Název	Návaznost	Koeficient $\beta$	$\Sigma Mstage$	Definice	RDZ
Výrub	Initial phase	0,7	0,3	Výrub	-
Pokl. kotlina	Výrub	0,3	1	Vložení výztuže	-
Výztuž	Výrub	0,3	1	Vložení výztuž	✓

Tab. 4 – Přehled nadefinování modelu v kalkulačním modulu

## 4. Porovnávání parametrů v závislosti na proměnné tuhosti a koeficientu bočního tlaku

### 4. 1. Parametry poklesové kotliny

Předmětem porovnávání jsou parametry poklesové kotliny, mezi kterými jsou vyhodnoceny poklesy na povrchu a umístění inflexního bodu. Inflexním bodem rozumíme bod, kde se tvar poklesové kotliny proměňuje z konkávního na konvexní charakter, neboli bod, kde hodnota poměrného přetvoření poklesové kotliny mění své znaménko. Odečet polohy inflexního bodu popisuje obrázek č. 16. Prvním zobrazeným výstupem z kalkulačního modulu je deformovaná síť, ve které je promítnuta poklesová kotlina na povrchu. Pro zjištění umístění inflexních bodů je zapotřebí vytvořit řez poklesové kotliny na povrchu, který vygeneruje totální posuny a po vyobrazení normálového přetvoření je možné vyhledat tato umístění nulových poměrných přetvoření.



Obr. 16 – Určení polohy inflexního bodu

Vzdáleností inflexního bodu je myšlena vzdálenost od nuly, průmětu počátku souřadnicového systému modelu (středu kruhového díla) na povrch. V tabulce č. 5 jsou vypsány hodnoty těchto vzdáleností. Graf č. 1 popisuje průběhy změn umístění

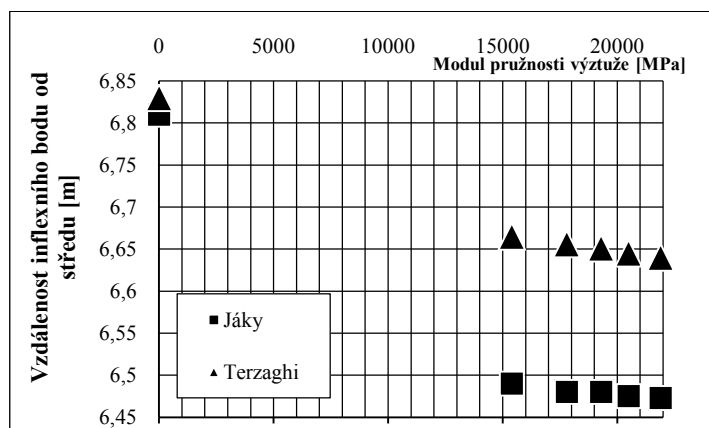


inflexních bodů v závislosti na proměnných tuhostech výztuže a na rozdílných koeficientech bočního tlaku.

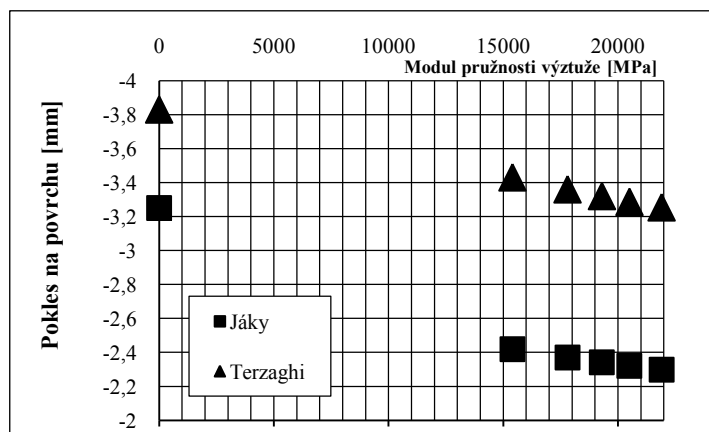
	Bez výztuže	15 400MPa	17 800MPa	19 300MPa	20 500MPa	21 900MPa
Jáky $K_n=0,7076$	6,81m	6,49m	6,48m	6,48m	6,475m	6,473m
Terzaghi $K_o=0,5385$	6,83m	6,665m	6,656m	6,651m	6,645m	6,64m

Tab. 5 – Vzdálenost inflexního bodu v závislosti na tuhosti výztuže a bočním tlaku

Z grafu lze vyčíst klesající charakter vzdáleností inflexních bodů se zvyšující se tuhostí výztuže. Co se týče rozdílných koeficientů bočních tlaků, je zde jasné, že vyšší koeficient bočního tlaku bude vyvozovat méně rozšiřující se kotlinu než ten nižší. Proto u Terzaghiho koeficientu bočního tlaku, který je nižší než Jákyho, jsou hodnoty vzdáleností inflexního bodu vyšší a kotlina má tendenci se více rozšiřovat.



Graf 1 – Vzdálenost inflexního bodu



Graf 2 – Pokles na povrchu

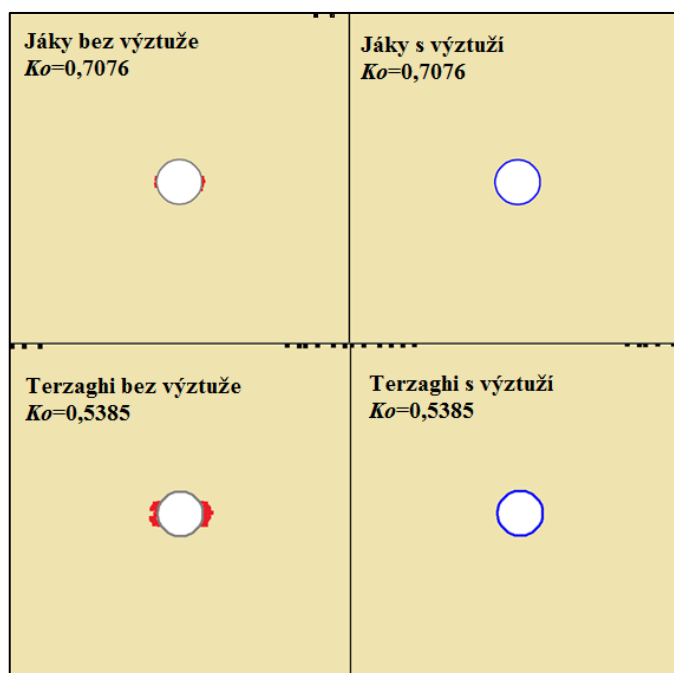
Dalším parametrem, spoluvytvářejícím tvar poklesové kotliny, je sedání na povrchu poklesové kotliny. Závislost sedání na rostoucí tuhosti a na dvou různých koeficientech bočního tlaku je zřejmá z tabulky č. 6, či z grafu č. 1. Sedání se s rostoucí tuhostí eliminuje. Vyšší koeficient bočního tlaku zabraňuje povrchu v sedání. Vyšší koeficient bočního tlaku vykazuje nižší hodnoty poklesu na povrchu.

	Bez výztuže	15 400MPa	17 800MPa	19 300MPa	20 500MPa	21 900MPa
Jáky $K_o=0,7076$	-3,25mm	-2,42mm	-2,37mm	-2,34mm	-2,32mm	-2,30mm
Terzaghi $K_o=0,5385$	-3,83mm	-3,43mm	-3,36mm	-3,32mm	-3,29mm	-3,25mm

Tab. 6 – Sedání povrchu poklesové kotliny v závislosti na tuhosti výztuže a bočním tlaku

## 4. 2. Čerpání smykové pevnosti, Plastické body

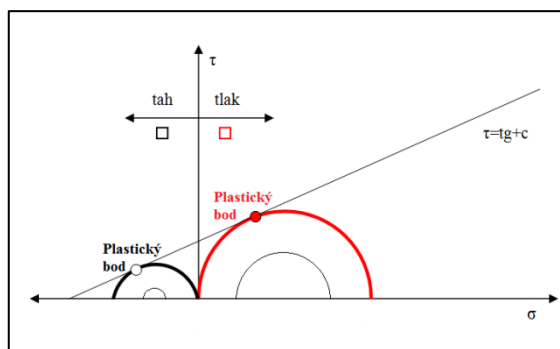
Hlavní napětí v každém trojúhelníkovém prvku sítě definuje Mohrovou kružnici, a pokud se tato kružnice dotýká Mohrovy obálky, vznikají plastické body, které systém PLAXIS ve svém grafickém výstupu ukazuje. Na těchto výstupech lze vysledovat vznik tahových trhlin a místa s tlakovým porušením, jak je možné vidět na obrázku č. 17.



Obr. 17 – Výskyt plastických bodů

Podmínka vzniku plastických bodů je znázorněna na obrázku. č. 18. Červeně jsou znázorněny tlakové plastické body, černě plastické body tahové. Tlakový plastický bod nastává na pravé straně od vertikální osy, hlavní napětí tedy nabývají kladných hodnot, zatímco porušení v tahu je zakresleno na levé straně od vertikální osy a hlavní napětí nabývají záporných hodnot.

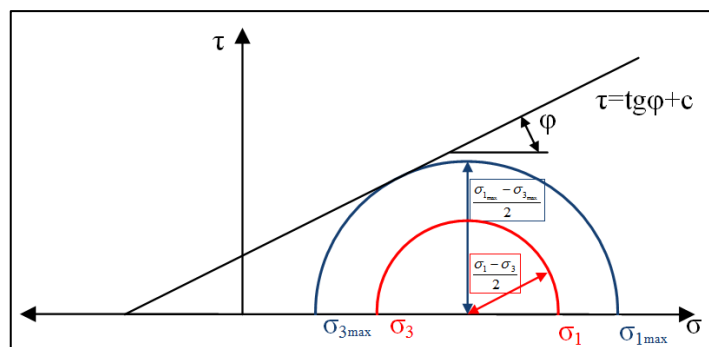
Plastické body se, v případě výstupů tohoto modelu, vyskytují tlakové a tahové u obou modelů nevyztužených děl u obou případů užitých koeficientů bočních tlaků. Po vyztužení se výskyt plastických bodů redukoval, a to u Jákyho vyjádření koeficientu bočního tlaku na nulu, a v případě užití Terzaghiho vztahu, se tahové plastické body na povrchu poklesové kotliny stále vyskytují. Výskyt plastických bodů se s rostoucí tuhostí zanedbatelně měnil, proto jsou na obrázku č. 17 zobrazeny výstupy modelu nevyztuženého díla a modelu díla vyztuženého ostěním s nejnižší tuhostí ( $E=15\,400\text{ MPa}$ ).



Obr. 18 – Plastické body

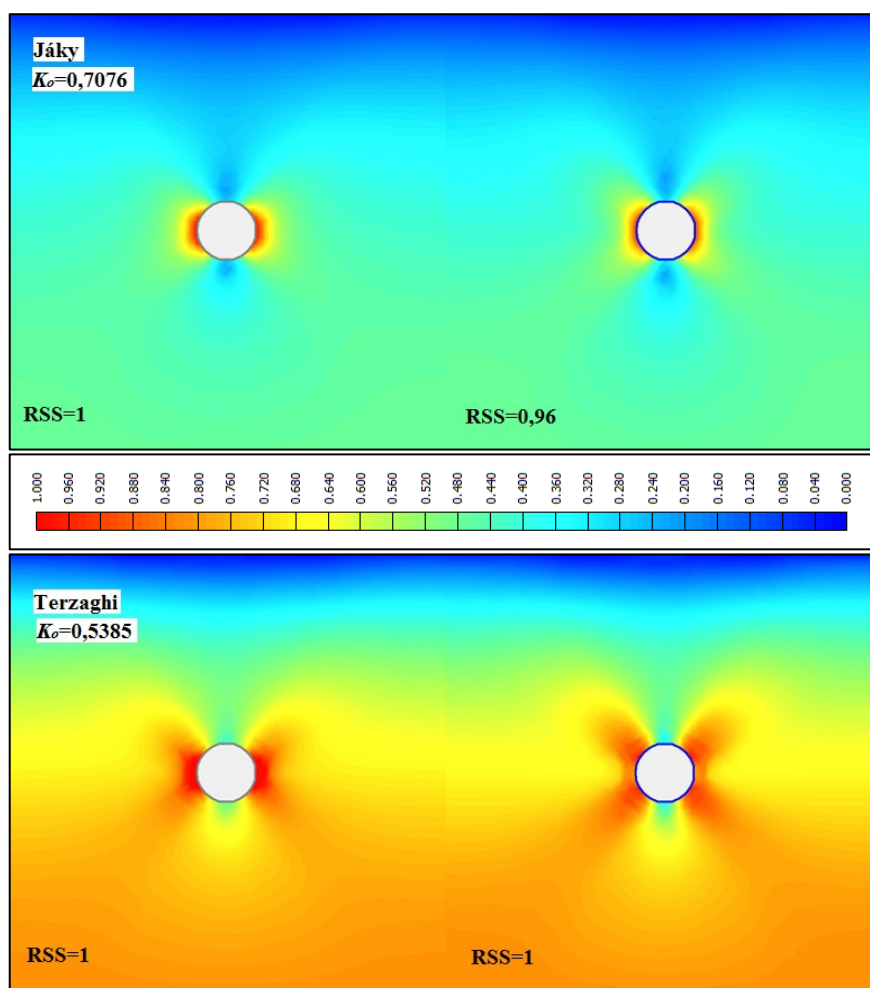
Čerpání smykové pevnosti  $RSS$  (Relative Shear Shadings) je dalším parametrem, který může být vyjádřen pomocí Mohr - Coulombového kritéria porušení.  $RSS$  značí poměr mezi poloměrem Mohrovy kružnice  $r$  řešeného elementu s poloměrem Mohrovy kružnice, která se dotýká Mohrovy obálky  $r_{max}$ , jak je znázorněno na obrázku č. 19.

$$RSS = \frac{r}{r_{max}} = \frac{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}}{\frac{\sigma_{1_{max}} - \sigma_{3_{max}}}{2}} \quad - 6 -$$



Obr. 19 – Čerpání smykové pevnosti

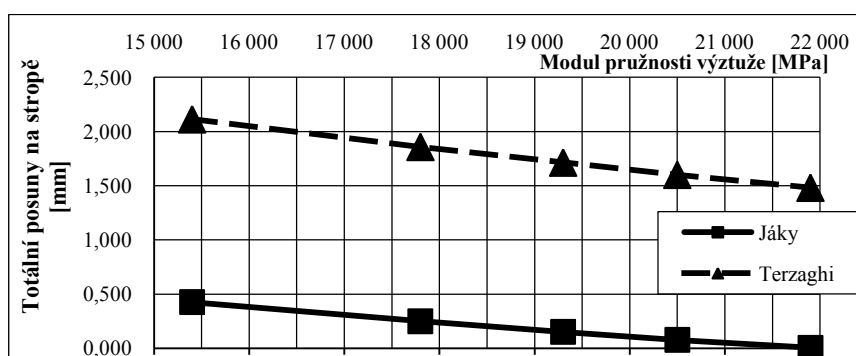
Z vyhodnocení čerpání pevnosti (obrázek č. 20) vyplývá rozmezí čerpání pevnosti 0,96 - 1, což indikuje vysokou úroveň čerpání pevnosti. Pomocí měřítka barevného spektra jsme relativně schopni vyjádřit čerpání smykové pevnosti ve všech místech modelu v závislosti na zvoleném rozlišení. Místa, kde RSS nabývá hodnot 1 se soustřeďují na bocích díla.



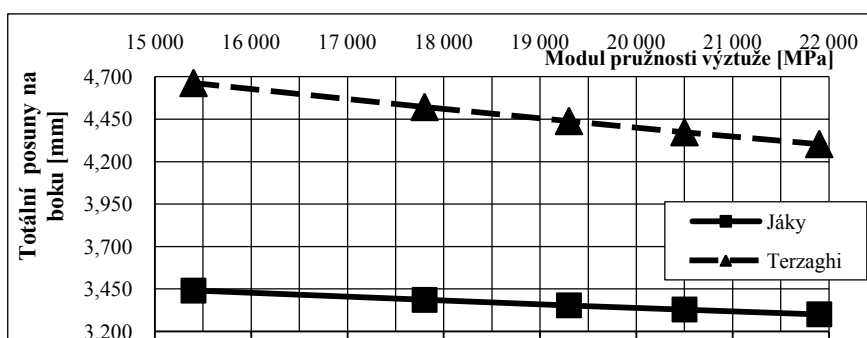
Obr. 20 – Čerpání smykové pevnosti

### 4. 3. Deformace, vnitřní síly a zatížení výztuže

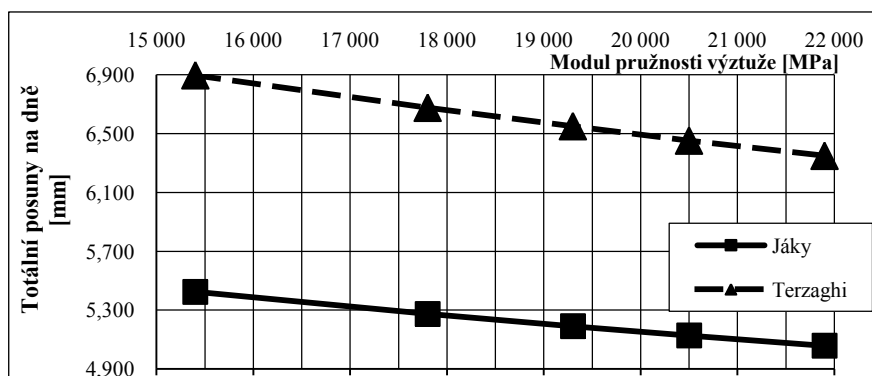
Dalším parametrem závislým na rostoucí tuhosti výztuže jsou totální posuny výztuže s důrazem na umístění po obvodu díla. Jejich průběhy jsou vždy klesající. Z toho lze vyvodit, že s rostoucí tuhostí výztuže posuny výztuže narůstají a nejvyšší posuny se vyskytují při nejnižší tuhosti výztuže pro  $E=15\,400$  MPa. (Graf č. 3, 4, 5). Porovnání totálních posunů s ohledem na jejich umístění, vystihují grafy č. 6, 7.



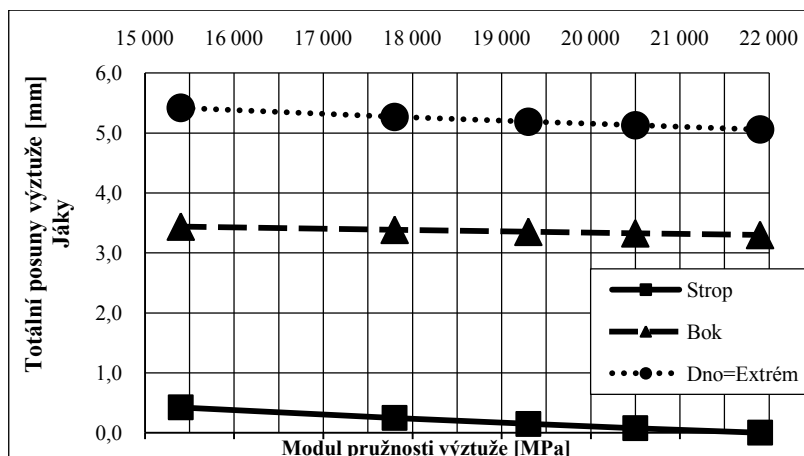
Graf 3 – Totální posuny výztuže na stropě díla



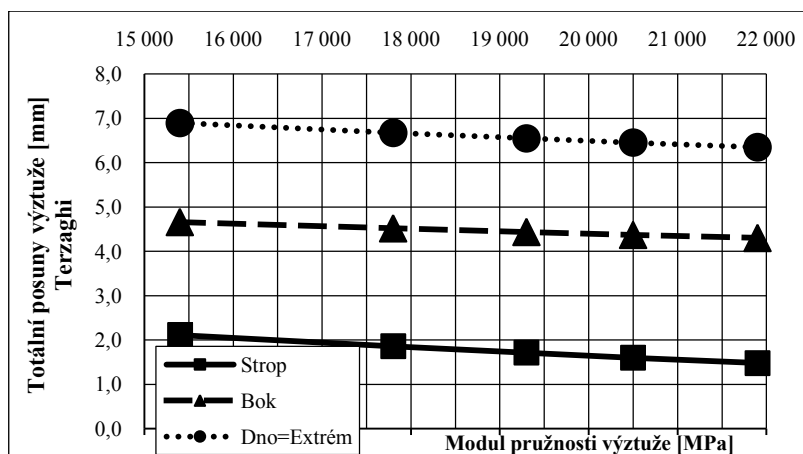
Graf 4 – Totální posuny výztuže na boku díla



Graf 5 – Totální posuny výztuže na dně díla

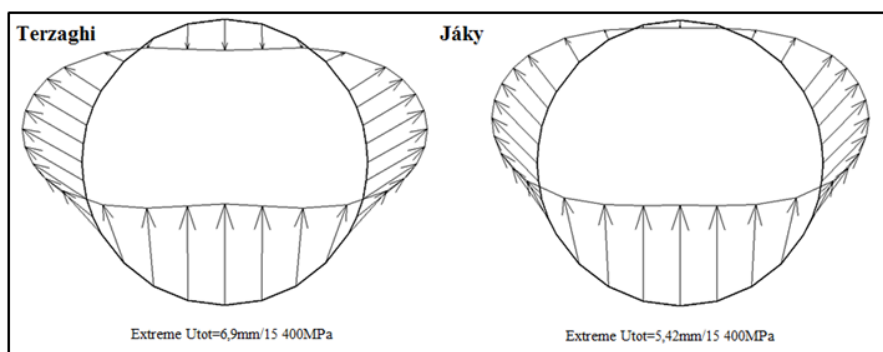


Graf 6 – Totální posuny výztuže - Jáky

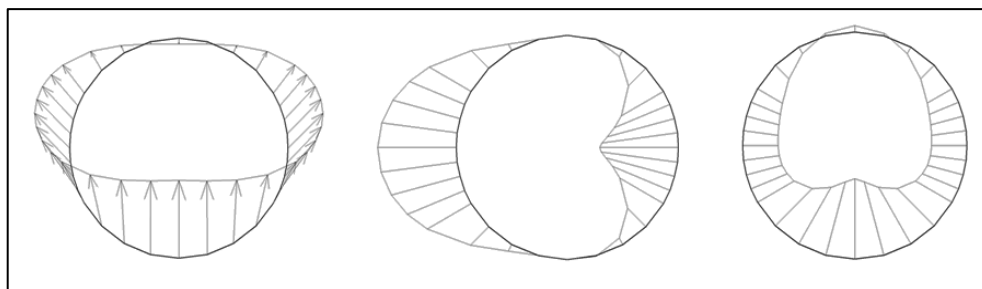


Graf 7 – Totální posuny výztuže - Terzaghi

Grafické porovnání totálních posunů výztuže vzhledem k různým koeficientům bočního tlaku popisuje obrázek č. 21. Terzaghiho nižší koeficient bočního tlaku způsobuje na stropě, boku a dně díla větší totální posuny výztuže. U obou koeficientů bočního tlaku se extrémní totální posun vyskytuje na dně díla.



Obr. 21 – Grafický výstup totálních posunů výztuže pro různé boční tlaky

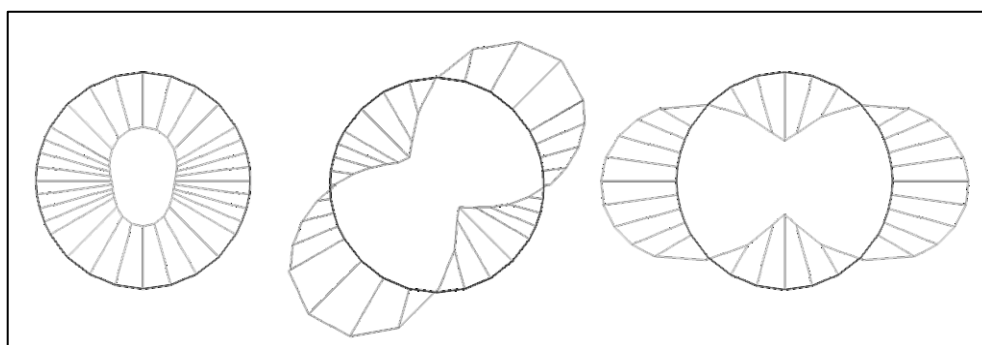


Obr. 22 – Grafický výstup deformací (zleva: totální, horizontální, vertikální posuny)

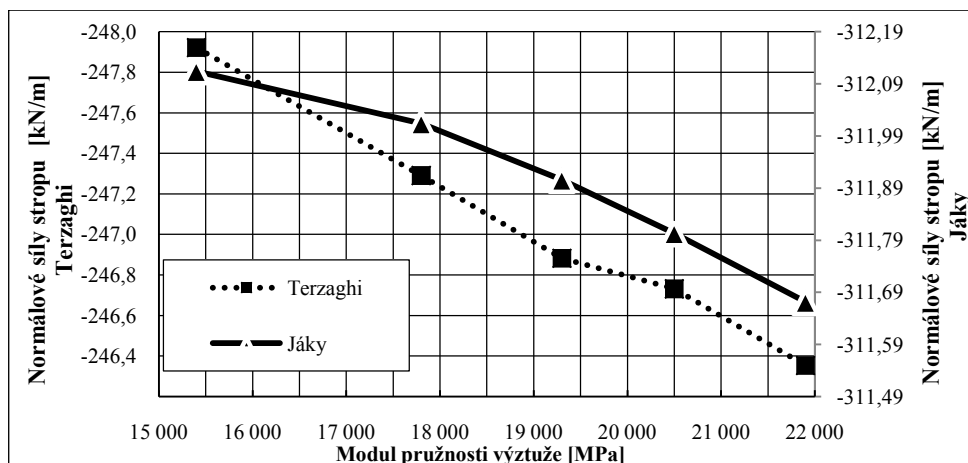
		E=15400MPa	E=17800MPa	E=19300MPa	E=20500MPa	E=21900MPa
Jáky	Strop	0,43	0,25	0,15	0,08	0,00
	Bok	3,44	3,39	3,35	3,33	3,30
K <sub>o</sub> =0,7076	Dno	5,42	5,27	5,19	5,13	5,06
	Extrém	5,42	5,27	5,19	5,13	5,06
Terzaghi	Strop	2,11	1,86	1,71	1,60	1,48
	Bok	4,66	4,52	4,44	4,37	4,30
K <sub>o</sub> =0,5385	Dno	6,90	6,68	6,55	6,45	6,35
	Extrém	6,90	6,80	6,55	6,45	6,35

Tab. 7 – Totální posuny výztuže [mm]

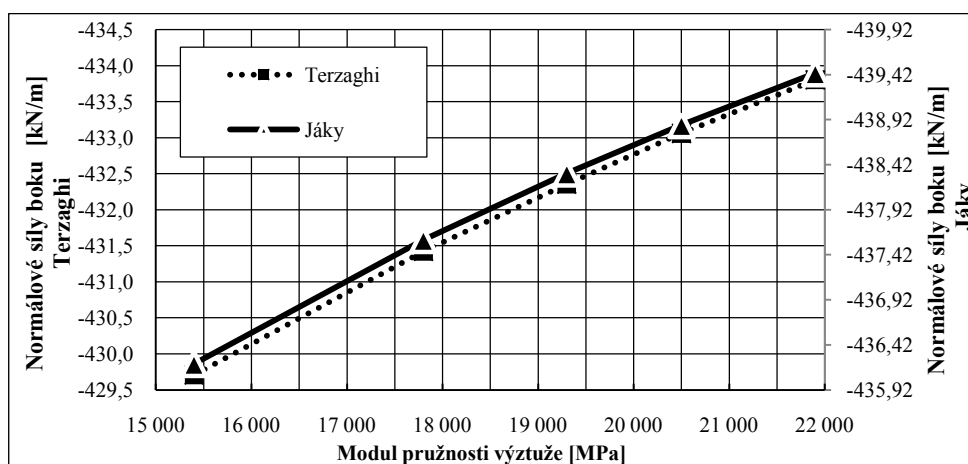
Vnitřní síly ve výztuži jsou důležitým parametrem pro zjištění napětí v krajních vláknech. Hodnoty normálových sil a ohybových momentů byly odečteny pro strop, bok a dno díla s důrazem na umístění extrému. Pro přehlednost jsou hodnoty ohybových momentů vyskytujících se na bocích díla v absolutních hodnotách. Grafy č. 8 - 13 znázorňují rostoucí nebo klesající charakter vnitřních sil s rostoucí tuhostí výztuže. Grafy č. 14 - 17 vystihují průběhy vnitřních sil s rostoucí tuhostí výztuže s důrazem na umístění jejích extrémů. Obrázek č. 23 graficky vystihuje průběhy vnitřních sil ve výztuži. V tabulce č. 8 jsou vypsané hodnoty vnitřních sil výztuže. Hodnoty smykových sil nejsou zaznamenávány, neboť s nimi není spolupracováno.



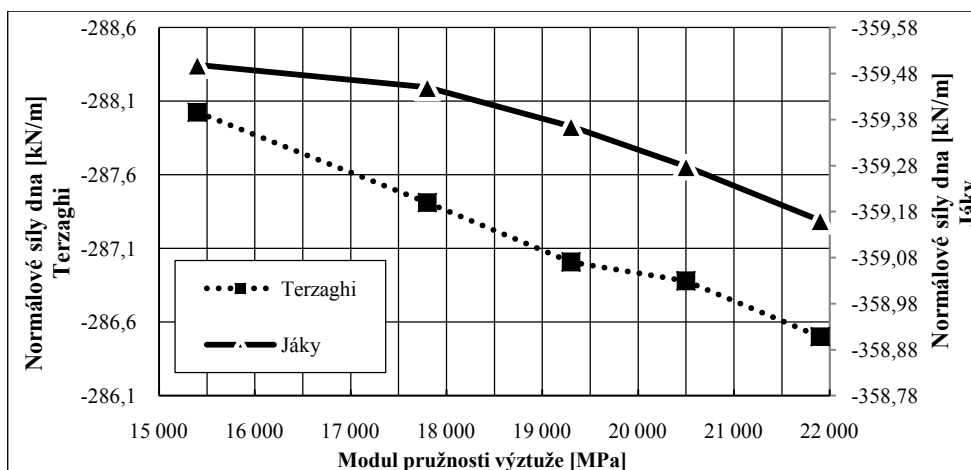
Obr. 23 – Grafický výstup vnitřních sil  
(zleva: normálové síly, smykové síly, ohybové momenty)



Graf 8 – Normálové síly ve výztuži na stropě díla

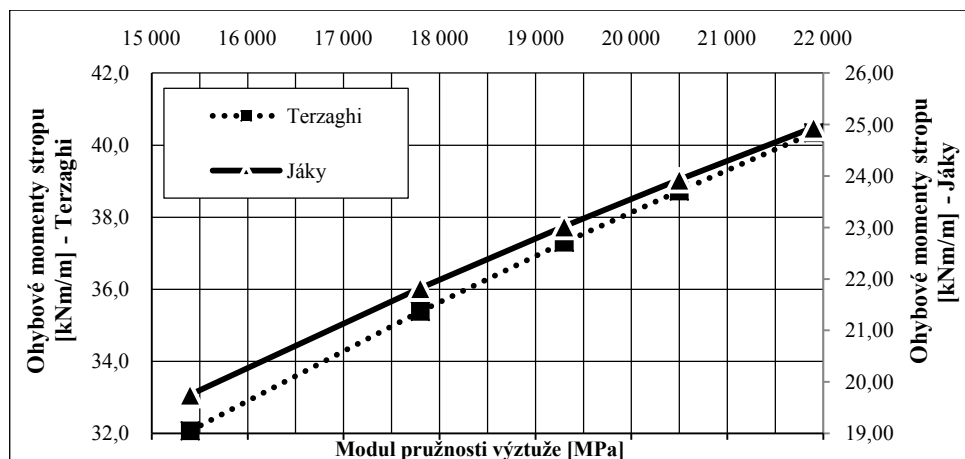


Graf 9 – Normálové síly ve výztuži na boku díla

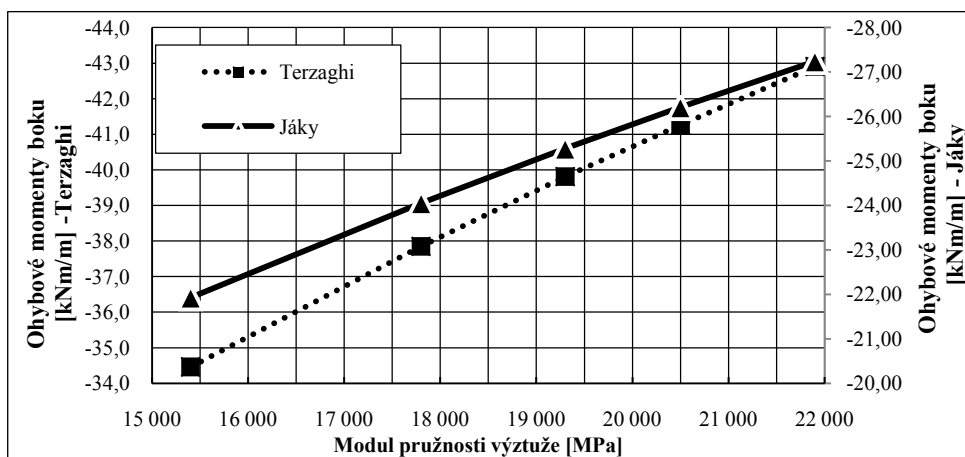


Graf 10 – Normálové síly ve výztuži na dně díla

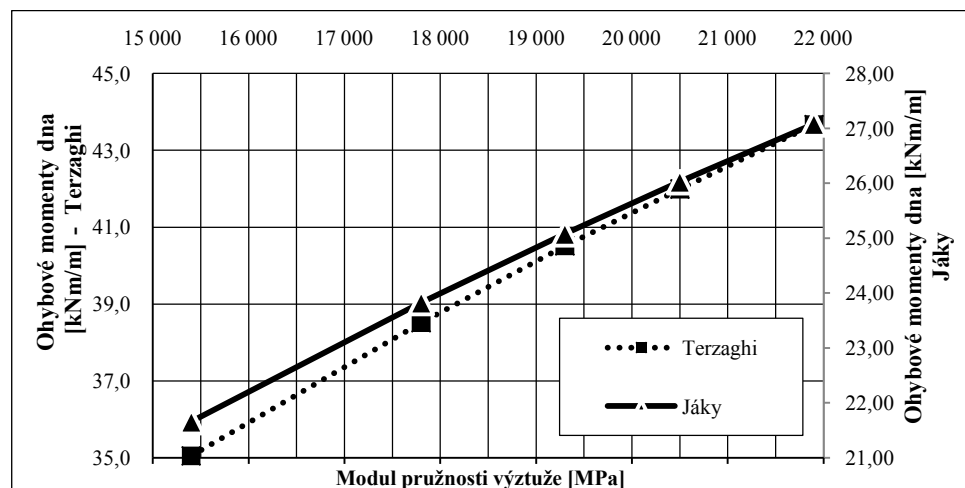




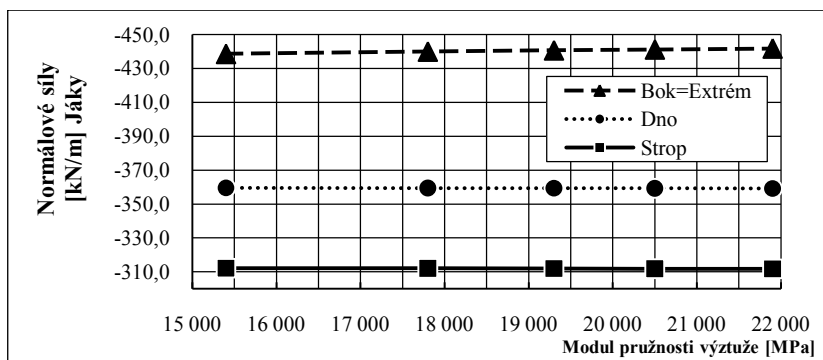
Graf 11 – Ohybové momenty výztuže na stropu díla



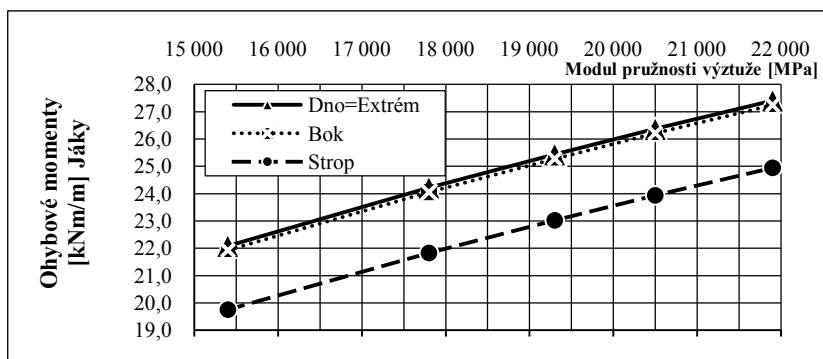
Graf 12 – Ohybové momenty výztuže na boku díla



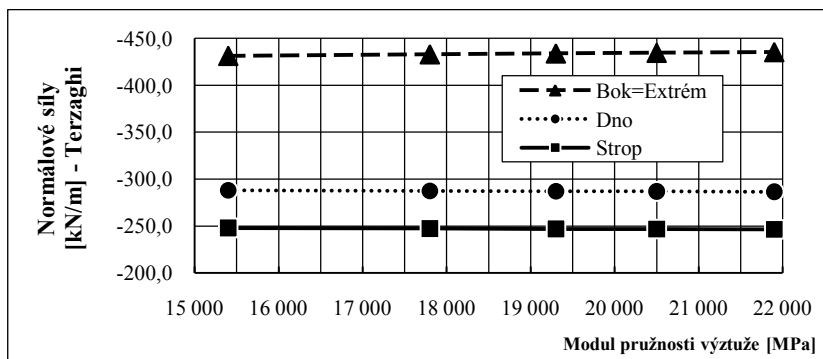
Graf 13 – Ohybové momenty výztuže na dně díla



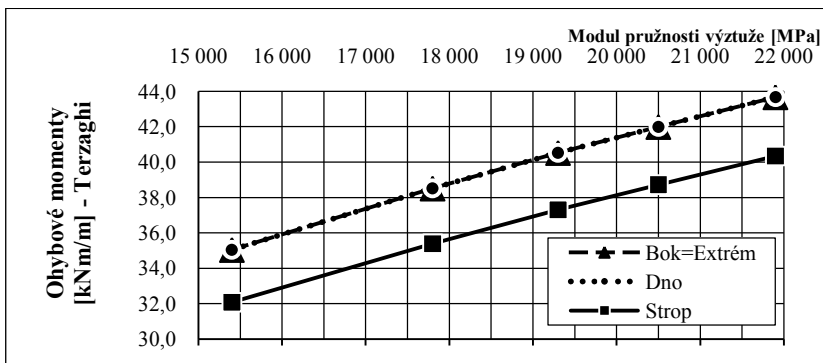
Graf 14 – Normálové síly - Jáky



Graf 15 – Ohybové momenty - Jáky



Graf 16 – Normálové síly - Terzaghi



Graf 17 – Ohybové momenty - Terzaghi

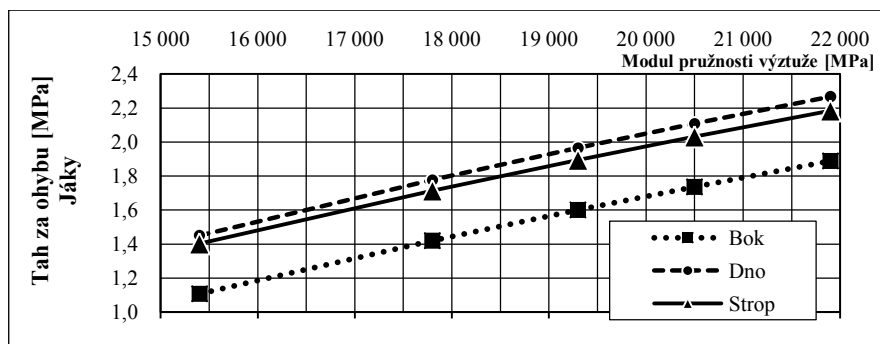
Průběhy normálových sil ve výztuži na bocích díla (graf 9) mají rostoucí charakter, tyto hodnoty normálových sil na boku díla vykazují zároveň extrémní hodnoty vzhledem k umístění po obvodě díla. Hodnoty normálových sil na stropě a dně díla (graf 8, 10) však s rostoucí tuhostí klesají. Jelikož průběhy ohybových momentů na stropě, boku a dně díla (graf 11 - 13) mají rostoucí charakter, průběh celkového napětí výztuže, vyjádřeného vztahem -2-, bude mít rostoucí charakter s rostoucí tuhostí, což bude dále dokázáno.

			E=15400MPa	E=17800MPa	E=19300MPa	E=20500MPa	E=21900MPa
Jáky	N [kN/m]	Strop	-312,1177	-312,0175	-311,9094	-311,8070	-311,6751
		Bok	-436,2132	-437,5892	-438,3273	-438,8641	-439,4395
		Dno	-359,4957	-359,4469	-359,3622	-359,2749	-359,1576
		Extrém	-438,6700	-440,0200	-440,7400	-441,2700	-441,8300
Ko=0,7076	M [kNm/m]	Strop	19,7537	21,8254	23,0240	23,9343	24,9455
		Bok	-21,9287	-24,0517	-25,2782	-26,2088	-27,2419
		Dno	21,6572	23,8278	25,0799	26,0291	27,0821
		Extrém	-438,6700	-440,0200	-440,7400	-441,2700	-441,8300
Terzaghi	N [kN/m]	Strop	-247,9215	-247,2904	-246,8822	-246,7316	-246,3529
		Bok	-429,7080	-431,4203	-432,3561	-433,0589	-433,8034
		Dno	-287,9935	-287,3806	-286,9776	-286,8494	-286,4710
		Extrém	-431,3100	-432,9800	-433,8900	-434,5800	-435,3100
Ko=0,5385	M [kNm/m]	Strop	32,0730	35,3893	37,3078	38,7243	40,3410
		Bok	-34,4594	-37,8511	-39,8106	-41,2569	-42,9059
		Dno	35,0438	38,5143	40,5162	41,9903	43,6721
		Extrém	-35,0400	-38,5100	-40,5200	-41,9900	-43,6700

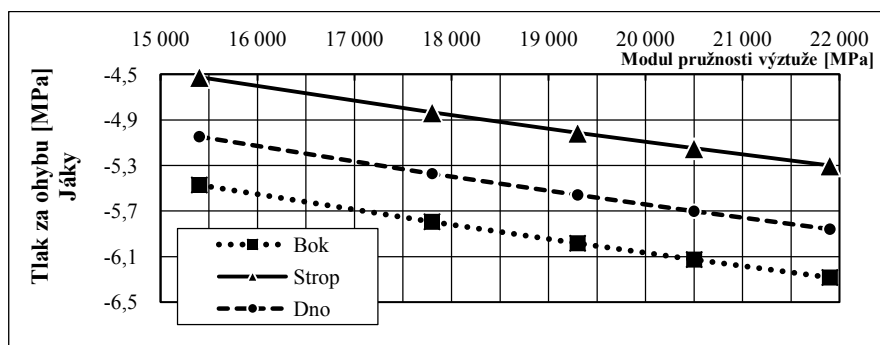
Tab. 8 – Vnitřní síly ve výztuži

#### 4. 4. Napětí ve výztuži

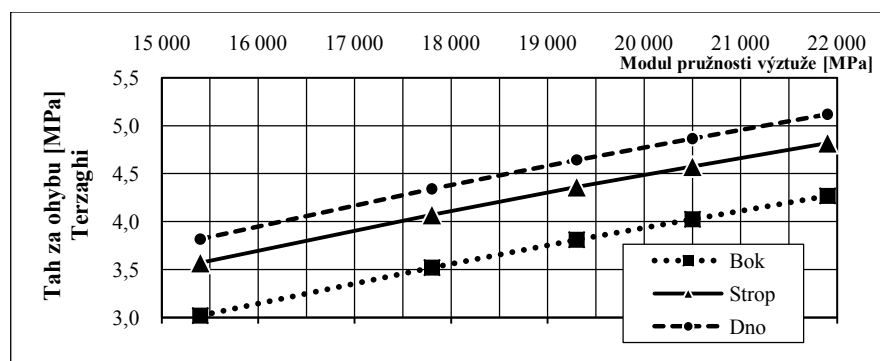
Uvedený vztah -2- byl použit pro zjištění napětí v krajních vláknech homogenizovaného průřezu. V tabulce č. 9, 10 jsou vypsány hodnoty vypočtených napětí ve výztuži homogenizovaného průřezu s příslušnými vnitřními silami ve výztuži. V následujících grafech č. 18 – 21 jsou zobrazeny průběhy napětí v závislosti na rostoucí tuhosti výztuže. Z grafů lze jednoznačně vyčíst, že průběhy napětí s rostoucí tuhostí výztuže mají, v každém případě, rostoucí charakter. Grafy 22 - 24 zobrazují lineární průběh extrémních hodnot napětí po výšce homogenizovaného průřezu. Z těchto grafů lze vyčíst, že nižší koeficient bočního tlaku dle Terzaghiho vyvoluje ve výztuži vyšší napětí.



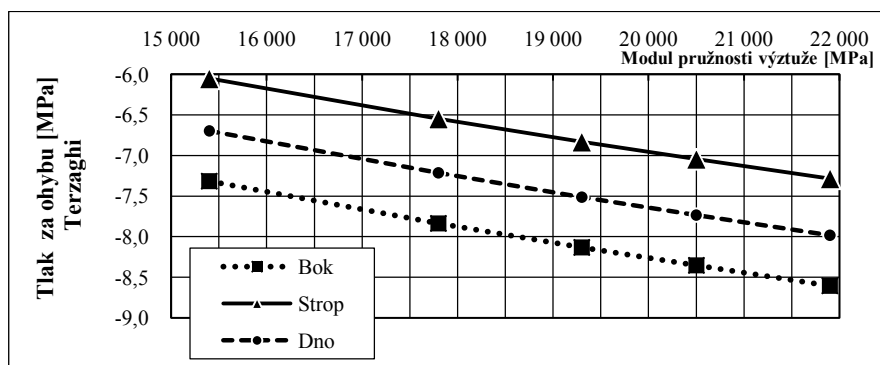
Graf 18 – Tah za ohybu - Jáky



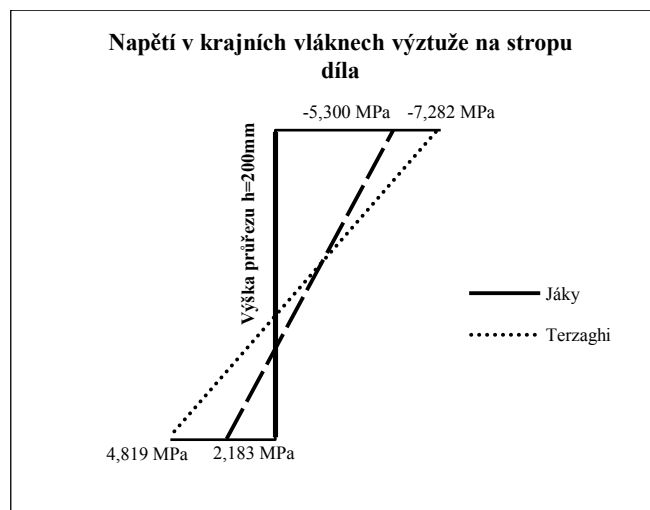
Graf 19 – Tlak za ohybu - Jáky



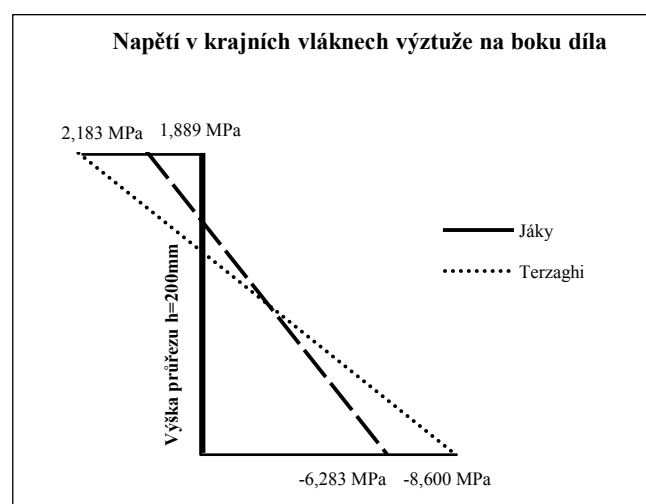
Graf 20 – Tah za ohybu - Terzaghi



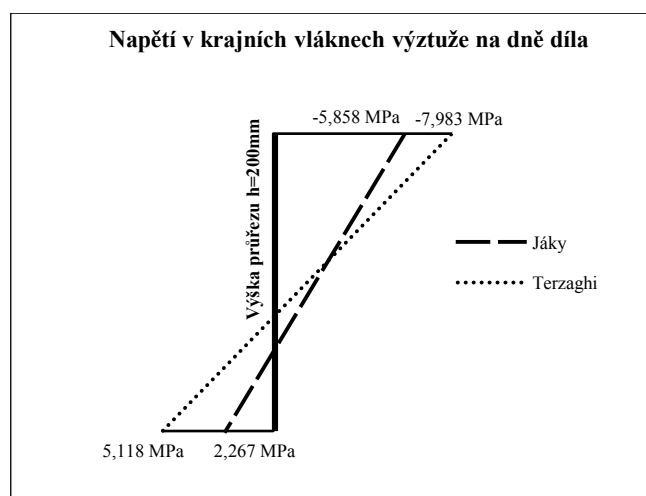
Graf 21 – Tlak za ohybu - Terzaghi



*Graf 22 – Napětí v krajních vláknech na stropu díla*



*Graf 23 – Napětí v krajních vláknech na boku díla*



*Graf 24 – Napětí v krajních vláknech na dně díla*

Tři průřezy s extrémními hodnotami napětí v krajních vláknech jsou zpětně použity pro zjištění napětí po výšce heterogenního průřezu ocelobetonové výztuže. Jedná se o napětí v krajních vláknech na stropě, boku a dně díla při nejvyšší tuhosti výztuže ( $E=21\,900\text{MPa}$ ) za použití Terzaghiho koeficientu bočního tlaku. Jejich hodnoty jsou  $4,82\text{MPa}$  na lici,  $-7,282\text{MPa}$  na rubu pro strop díla,  $-8,6\text{MPa}$  na lici,  $2,183\text{MPa}$  na rubu na boku díla a  $5,118\text{MPa}$  na lici,  $-7,983\text{MPa}$  na rubu na dně díla (grafy č. 22 - 24). Z těchto hodnot lze usoudit, že na stropě a dně díla dochází k tlaku na horních vláknech výztuže, (horní vlákna = rub = kontakt s horninou) a k tahu na dolních vláknech výztuže, na boku díla, je tomu ale právě naopak, horní vlákna výztuže jsou tažená, kdežto spodní jsou tlačena.

Jáky		E=15400MPa	E=17800MPa	E=19300MPa	E=20500MPa	E=21900MPa	
Strop	N	-312,12	-312,02	-311,91	-311,81	-311,68	kN/m
	M	19,75	21,83	23,02	23,93	24,95	kNm/m
	$\sigma+$	1402,47	1713,73	1894,06	2031,11	2183,46	kPa/m
	$\sigma-$	-4523,64	-4833,90	-5013,16	-5149,18	-5300,21	kPa/m
Bok	N	-436,21	-437,59	-438,33	-438,86	-439,44	kN/m
	M	-21,93	-24,05	-25,28	-26,21	-27,24	kNm/m
	$\sigma+$	-5470,38	-5795,71	-5983,37	-6125,64	-6283,48	kPa/m
	$\sigma-$	1108,24	1419,82	1600,10	1737,00	1889,09	kPa/m
Dno	N	-359,50	-359,45	-359,36	-359,27	-359,16	kN/m
	M	21,66	23,83	25,08	26,03	27,08	kNm/m
	$\sigma+$	1451,11	1776,93	1965,17	2107,99	2266,54	kPa/m
	$\sigma-$	-5046,06	-5371,40	-5558,80	-5700,74	-5858,11	kPa/m

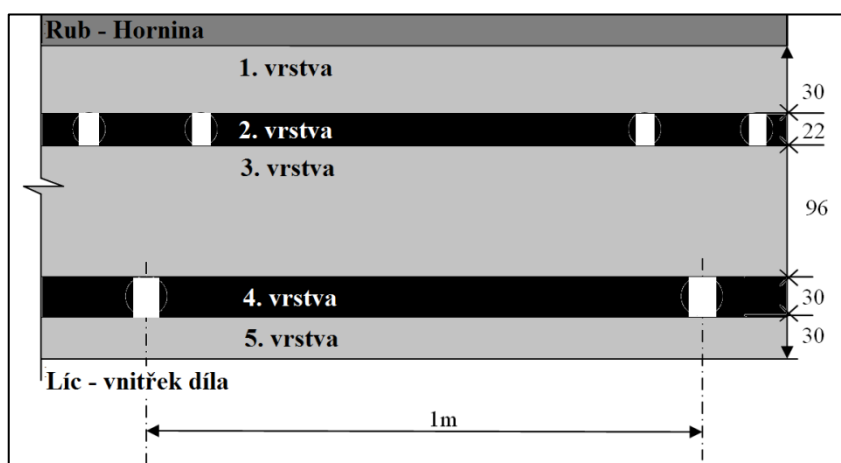
Tab. 9 – Vnitřní síly ve výztuži a jejich příslušná napětí v krajních vláknech – Jáky  
( $\sigma+$ ...ve výpočtu napětí podle -2- použit součet,  $\sigma-$ ...ve výpočtu napětí podle -2- použit odečet)

Terzaghi		E=15400MPa	E=17800MPa	E=19300MPa	E=20500MPa	E=21900MPa	
Strop	N	-247,92	-247,29	-246,88	-246,73	-246,35	kN/m
	M	32,07	35,39	37,31	38,72	40,34	kNm/m
	$\sigma+$	3571,35	4071,95	4361,76	4574,99	4819,40	kPa/m
	$\sigma-$	-6050,56	-6544,86	-6830,58	-7042,31	-7282,92	kPa/m
Bok	N	-429,71	-431,42	-432,36	-433,06	-433,80	kN/m
	M	-34,46	-37,85	-39,81	-41,26	-42,91	kNm/m
	$\sigma+$	-7317,45	-7834,77	-8133,38	-8353,84	-8604,90	kPa/m
	$\sigma-$	3020,37	3520,57	3809,81	4023,25	4266,87	kPa/m
Dno	N	-287,99	-287,38	-286,98	-286,85	-286,47	kN/m
	M	35,04	38,51	40,52	41,99	43,67	kNm/m
	$\sigma+$	3816,60	4340,25	4642,55	4864,30	5118,47	kPa/m
	$\sigma-$	-6696,54	-7214,05	-7512,33	-7732,80	-7983,18	kPa/m

Tab. 10 – Vnitřní síly ve výztuži a jejich příslušná napětí v krajních vláknech – Terzaghi  
( $\sigma+$ ...ve výpočtu napětí podle -2- použit součet,  $\sigma-$ ...ve výpočtu napětí podle -2- použit odečet)

Ke zjištění průběhu napětí po výšce heterogenního „reálného“ průřezu, je zapotřebí použití softwaru HOMO. Principem tohoto programu je získání přerozdělovacích koeficientů, kterými se přenásobí lineárně rozložené napětí homogenizovaného prvku ve vzdálenostech stanovených rozdílem materiálových vlastností heterogenního průřezu. Tabulka č. 11 - 13 stručně představuje metodiku zpracování se získanými přerozdělovacími koeficienty, výstupními hodnotami programu HOMO.

Na obrázku č. 3 je zakreslen řez výztuží. Výztuž ASTA 95 je příhradová výztuž, vzdálená od sebe 1m ve směru podélném vůči směru podzemního díla. Výztuž je složena ze tří ocelových prutů, ze dvou prutů o průměru 23mm a z dalšího o průměru 32 mm. Rostoucí modul pružnosti betonu v čase je popsán v publikaci [3]. Vstupními údaji programu HOMO je geometrie řezu výztuží, geometrie celého díla a materiálové charakteristiky oceli a betonu  $E$ ,  $\nu$ . Kruhové průřezy ocelových prutů jsou nahrazeny obdélníky o stejné ploše s podmínkou ponechání výšky vrstvy dle průměru prutu, jak je naznačeno na obrázku č. 24. Průřez je rozdělen na jednotlivé vrstvy podle modulu pružnosti každé vrstvy. Vrstvy obsahující dva materiály, tedy ocel a beton, jsou homogenizovány nejdříve. Poté se postupně vzájemně vrstvy homogenizují směrem od líce, až dokud nevznikne kompletní homogenizovaný průřez o jednotném modulu pružnosti  $E$ .



Obr. 24 – Vstupní model programu HOMO

Strop		Umístění od líce [m]	Napětí homogenního prvku [MPa]	přerozdělovací koeficient		Skutečné napětí [MPa]	
				Beton	Ocel	Beton	Ocel
1	líc	0,000	4,820	0,932	0	4,491	0,000
	rub	0,020	3,610	1,010	0	3,647	0,000
2	líc	0,020	3,610	0,923	9,499	3,330	34,291
	rub	0,052	1,673	0,995	10,241	1,665	17,138
3	líc	0,052	1,673	0,909	0	1,522	0,000
	rub	0,148	-4,135	0,953	0	-3,943	0,000
4	líc	0,148	-4,135	0,871	8,833	-3,601	-36,530
	rub	0,170	-5,467	0,945	9,576	-5,164	-52,348
5	líc	0,170	-5,467	0,863	0	-4,718	0,000
	rub	0,200	-7,282	0,933	0	-6,798	0,000

Tab. 11 – Metodika programu HOMO – přeroz. koef. pro strop díla

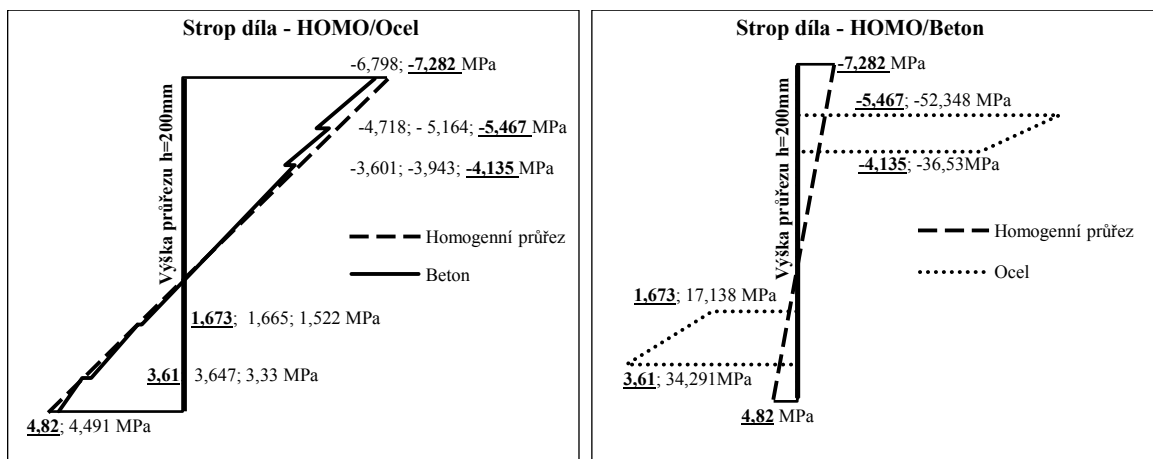
Bok		Umístění od líce [m]	Napětí homogenního prvku [MPa]	přerozdělovací koeficient		Skutečné napětí [MPa]	
				Beton	Ocel	Beton	Ocel
1	líc	0,000	-8,600	0,932	0	-8,013	0,000
	rub	0,020	-7,522	1,010	0	-7,599	0,000
2	líc	0,020	-7,522	0,923	9,499	-6,940	-71,451
	rub	0,052	-5,796	0,995	10,241	-5,766	-59,362
3	líc	0,052	-5,796	0,909	0	-5,271	0,000
	rub	0,148	-0,621	0,953	0	-0,592	0,000
4	líc	0,148	-0,621	0,871	8,833	-0,540	-5,482
	rub	0,170	0,566	0,945	9,576	0,534	5,416
5	líc	0,170	0,566	0,863	0	0,488	0,000
	rub	0,200	2,183	0,933	0	2,038	0,000

Tab. 12 – Metodika programu HOMO – přeroz. koef. pro bok díla

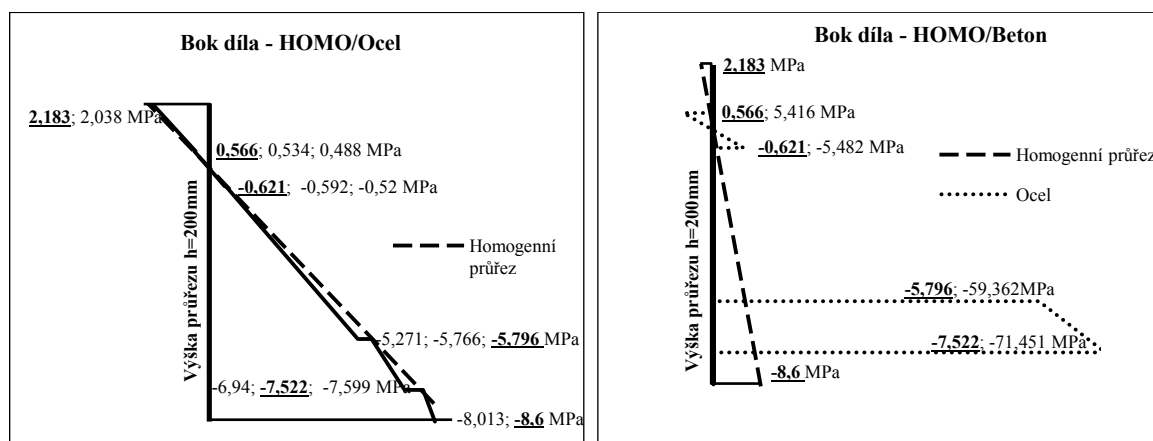
Dno		Umístění od líce [m]	Napětí homogenního prvku [MPa]	přerozdělovací koeficient		Skutečné napětí [MPa]	
				Beton	Ocel	Beton	Ocel
1	líc	0,000	5,118	0,932	0	4,769	0,000
	rub	0,020	3,808	1,010	0	3,847	0,000
2	líc	0,020	3,808	0,923	9,499	3,513	36,173
	rub	0,052	1,712	0,995	10,241	1,703	17,530
3	líc	0,052	1,712	0,909	0	1,556	0,000
	rub	0,148	-4,577	0,953	0	-4,364	0,000
4	líc	0,148	-4,577	0,871	8,833	-3,985	-40,428
	rub	0,170	-6,018	0,945	9,576	-5,684	-57,626
5	líc	0,170	-6,018	0,863	0	-5,194	0,000
	rub	0,200	-7,983	0,933	0	-7,452	0,000

Tab. 13 – Metodika programu HOMO – přeroz. koef. pro dno díla

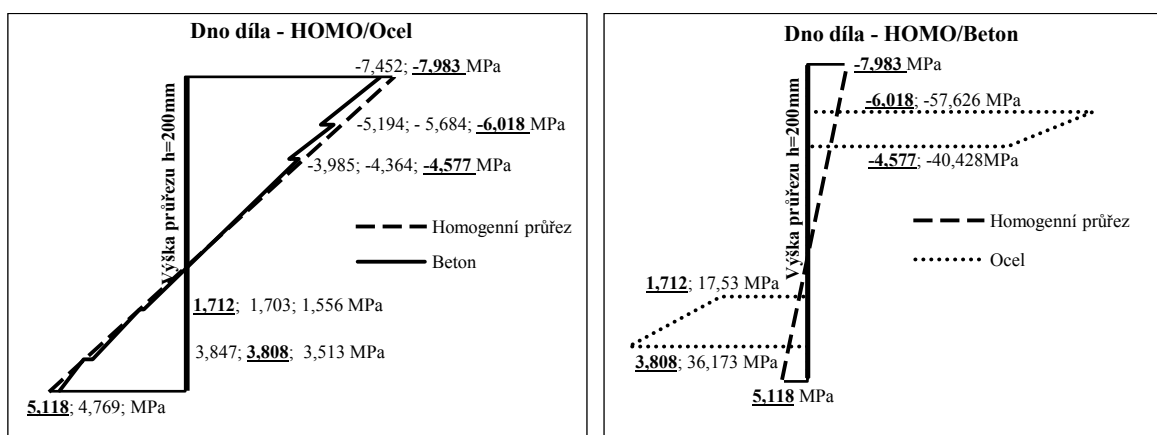




Graf 25 – Průběhy napětí po výšce „Reálného průřezu“ – strop díla  
(vlevo srovnání napětí homogenizovaného průřezu s napětím v oceli, vpravo srovnání napětí homogenizovaného průřezu s napětím v betonu, podtržené hodnoty patří napětí v homogenizovaném průřezu)



Graf 26 – Průběhy napětí po výšce „Reálného průřezu“ – bok díla  
(vlevo srovnání napětí homogenizovaného průřezu s napětím v oceli, vpravo srovnání napětí homogenizovaného průřezu s napětím v betonu, podtržené hodnoty patří napětí v homogenizovaném průřezu)



Graf 27 – Průběhy napětí po výšce „Reálného průřezu“ – dno díla  
(vlevo srovnání napětí homogenizovaného průřezu s napětím v oceli, vpravo srovnání napětí homogenizovaného průřezu s napětím v betonu, podtržené hodnoty patří napětí v homogenizovaném průřezu)

## 5. Závěr

V programu Plaxis bylo namodelováno celkem deset podzemních kruhových děl vyztužených jednorodým ostěním – dva rozdílné koeficienty bočního tlaku, podle Terzaghiho a Jákyho vztahu, každý pro pět modelů o vyšší tuhosti výztuže. V závislosti na této rostoucí tuhosti výztuže byly porovnány parametry poklesové kotliny, posuny výztuže, vnitřní síly ve výztuži a vypočtená napětí v krajních vláknech výztuže.

Tvar poklesové kotliny může být vystižen poklesem na povrchu a vzdáleností inflexního bodu. Sedání povrchu se s rostoucí tuhostí výztuže eliminuje a vzdálenosti inflexního bodu se zkracují. Při nižším koeficientu bočního tlaku, pokles povrchu reaguje prohlubováním kotliny a vzdálenost inflexního bodu svým rozšiřováním. Extrémní pokles na povrchu se projevuje při nejnižší tuhosti výztuže v případě nižšího koeficientu bočního tlaku dle Terzaghiho.

Vývoj totálních posunů výztuže s rostoucí tuhostí výztuže má klesající charakter. Čím je výztuž tužší, totální posuny se snižují. Totální posuny výztuže byly vyhodnoceny pro strop, bok a dno díla. Dně díla lze jednoznačně přidělit umístění extrémů pro oba koeficienty bočního tlaku. Nižší koeficient bočního tlaku, dle Terzaghiho, vyvolal větší totální posuny na všech třech řešených místech.

Průběhy vnitřních sil - normálových sil a ohybových momentů, mají různý charakter v závislosti na rostoucí tuhosti výztuže. Vývoj ohybových momentů má, na všech třech řešených místech po obvodě díla, rostoucí charakter, ale normálové síly mají rostoucí charakter pouze na boku díla, zatímco na stropě a dně díla mají klesající charakter. Extrémní normálové síly se v obou případech koeficientů bočních tlaků vyskytují na boku díla, extrémní ohybové momenty se však projevují po obvodě díla různě. V případě Terzaghiho nižšího koeficientu bočního tlaku se extrémní ohybový moment nachází na boku díla, kdežto Jákyho koeficient bočního tlaku vyvolal extrémní hodnotu ohybového momentu na dně díla.

Ze získaných vnitřních sil byla odvozena napětí v krajních vláknech homogenizovaného průřezu výztuže. V průřezu vzniká tah a tlak za ohybu. Na stropě a dně díla jsou horní vlákna (kontakt s horninou) tlačena a spodní tažena, na boku díla jsou horní

vlákna tažená a spodní tlačená. Vývoj napětí s rostoucí tuhostí výztuže má rostoucí charakter. Terzaghiho nižší koeficient bočního tlaku vyvolává v průřezu vyšší napětí pro všechny tři řešená místa po obvodě díla.

Tři průřezy byly vyňaty pro zjištění průběhu napětí po výšce průřezu a to ty s napětími odpovídajícími nejvyšší tuhosti výztuže při užití koeficientu dle Terzaghiho, na stropě, boku a dně díla. U těchto zjištěných extrémních napětí v krajních vláknech homogenizovaného průřezu bylo zapotřebí užití programu HOMO pro získání jejich průběhu po výšce průřezu. Pomocí přerozdělovacích koeficientů, výstupních dat programu HOMO, byly zjištěny průběhy napětí heterogenního průřezu železobetonové výztuže, tedy zvlášť průběhy napětí pro ocel a pro beton, jenž byly porovnány s lineárním průběhem napětí po výšce homogenního průřezu.

Tím, že je výztuž podzemního díla tužší, že je její tloušťka posílena, je z pevnějšího materiálu nebo dílo samotné je menší, tím si dílo nemusí zdaleka pomoci bránit se proti působícímu zatížení od horninového prostředí. Z výše popsanych výstupů modelování lze vyvodit, že zvyšující tuhost sice snižuje totální posuny výztuže, naopak ale zvyšuje napětí ve výztuži. Jelikož jsou posuny výztuže menší, horninové prostředí méně s výztuží koordinuje, dílo se méně deformuje, a výztuž je tedy více namáhána. Její reakce je vyšší, samotné zatížení - radiální napětí je vyšší. A tedy, není pravdou, čím tužší výztuž, tím lepší systém hornina – výztuž, výztuž musí být určitě tuhá, ale poddajná natolik, aby se dílo mohlo deformovat a nechat napětí od horniny určitými posuny uvolnit a tím snížit napětí v ní samotné a zároveň natolik tuhá, aby jí zatížení neovlivnilo natolik, že by přišla o svoji únosnost a použitelnost.

## Použitá literatura

- [1] - JOSEF ALDORF. *MECHANIKA PODZEMNÍCH KONSTRUKCÍ*. Ostrava, 1999. ISBN 80-7078-695-7.
- [2] - BRINKGREVE, R.B.J. *Plaxis manual*. Netherlands: Balkema, 2002. ISBN 90-5809-508-8.
- [3] - MOHYLA MAREK. *Stanovení přetvárných parametrů primárního ostění podzemních děl*. Ph.D. Workshop, Institute of Geonics AS ČR, Ostrava 2010, ISBN 978-80-86407-96-8.
- [4] - KOLYMBAS DIMITRIOS. *Tunelling and Tunnel Mechanics: A Rational Approach to Tunnelling*. Berlin: Springer, 2005. ISBN 10 3-540-25196-0.
- [5] - Ankra, spol. s.r.o.: Kotevní technika. [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: <http://www.ankra.cz>

## **Poděkování**

Uctivě děkuji paní docentce Evě Hrubéšové, Ph.D. za odborné vedení této práce. Děkuji velice i panu inženýrovi Marku Mohylovi za konzultace spojené s touto prací.

Bakalářská práce byla vypracována za finanční podpory Operačního programu OP - Vzdělávání pro konkurenceschopnost (OP VK), oblast podpory 2.3 Lidské zdroje ve výzkumu a vývoji. Název projektu: Tvorba a internacionalizace špičkových vědeckých týmů a zvyšování jejich excelence na Fakultě stavební VŠB-TUO. Registrační číslo: CZ.1.07/2.3.00 /20.0013